



**Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE GRADO

**TÍTULO: Colonización de la Galaxia por una civilización extraterrestre
tecnológicamente avanzada**

AUTOR: Rodríguez Mota, Adrián

FECHA DE PRESENTACIÓN: Octubre, 2019

APELLIDOS: Rodríguez Mota

NOMBRE: Adrián

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

PLAN: 2019

DIRECTOR: Manuel Moreno Lupiáñez

DEPARTAMENTO: Departamento de Física

QUALIFICACIÓN DEL TFG

TRIBUNAL

PRESIDENTE

Javier Navarro Bosque

SECRETARIO

Alexander Lebrato González

VOCAL

Rafael Vidal Ferré

FECHA DE LECTURA: Octubre, 2019.

Este Proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales: ☐ Sí ☒ No

RESUMEN

Con el descomunal tamaño del universo y la cantidad de planetas que hay, es muy extraño que no hayamos tenido evidencias claras de vida extraterrestre en todo el periodo de existencia de la humanidad.

En este proyecto se ha realizado un análisis del artículo “Galactic civilizations: populations dynamics and interstellar diffusion” publicado por C. Sagan y W. Newman en 1978, con la intención de analizar la viabilidad de la hipótesis de que hay cálculos que sugieren que una civilización extraterrestre técnicamente avanzada podría establecerse en la Tierra de aquí unos miles de años.

Se han estudiado y analizado todas las ecuaciones que se deberían tener en cuenta para este suceso, y aplicando valores razonables para los parámetros que intervienen se llega a la conclusión de que la civilización debería tener una vida muy longeva con una gran motivación por la colonización para cumplirse la viabilidad de la hipótesis.

Se desarrolla un experimento numérico con el programa Matlab capaz de recrear los cálculos realizados por estos autores, y poder encontrar soluciones a otros valores para cada variable.

Finalmente, se estudian 3 posibles soluciones planteadas en el libro de Stephen Webb sobre la falta de evidencias de vida extraterrestre en la Tierra.

Palabras clave (máximo 10):

Civilización extraterrestre	Tasa específica emigración	Coeficiente de difusión	Colonización de Galaxia
Frente de onda colonización	Difusión interestelar	Vida extraterrestre	Dinámica población
Paradoja de Fermi	Civilización tecnológica avanzada		

ABSTRACT

With the large size of the universe and the amount of planets there are in it, it's very strange that we haven't seen evidence of extraterrestrial life in the entire period of humanity's existence.

In this project we have done an analysis of the article "Galactic civilizations: populations dynamics and interstellar diffusion" published by C. Sagan and W. I. Newman in 1978, with the intention examine the viability of the hypothesis that states that there exist calculations which suggest technically advanced extraterrestrial civilization could settle on the Earth in a few thousands of years

We have studied and analyzed all the equations that should be taken into account for this event, and applying reasonable values for the parameters involved. Then, we concluded that civilization should have a very long life with a great motivation for colonization to fulfill the viability of the hypothesis.

We have developed a numerical experiment with the Matlab program. The application created is capable of recreating the calculations made by these authors and be able to find solutions to other values for each variable.

Finally, we have studied the possible solutions raised in the book of Stephen Webb about the lack of evidences of aliens on planet earth.

Keywords (10 maximum):

Extraterrestrial civilization	Specific emigration rate	Diffusion coefficient	Colonization of the Galaxy
Colonization Wave Front	Interstellar diffusion	Extraterrestrial life	Population dynamics
Fermi paradox	Advanced technological civilization		

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 SITUACIÓN ACTUAL Y CONTEXTO	8
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	9
1.3 PRESENTACIÓN DE CARL SAGAN Y WILLIAM I. NEWMAN	9
1.4 LIBRO DE STEPHEN WEBB	10
1.5 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN CON MATLAB Y SIMULACIÓN DEL PROBLEMA	10
2. RESULTADOS OBTENIDOS POR SAGAN Y NEWMAN	12
3. RESULTADOS OBTENIDOS CON MATLAB	20
4. REPRESENTACIÓN DE GRÁFICAS Y VARIABLES.....	24
5. EL PROBLEMA DE LA VIDA EXTRATERRESTRE CON STEPHEN WEBB	40
6. CONCLUSIONES	43
AGRADECIMIENTOS.....	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y WEBGRAFÍA	45
ANEXOS.....	46
ANEXO A. script de matlab de la simulación completa.....	46
ANEXO B. script de matlab para la simulación colonización de la vía láctea y el universo	49
ANEXO C. scripts de matlab para la realización de las gráficas	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4. 1: Número de civilizaciones extraterrestres en la Vía Láctea en función del tiempo de vida medio de una civilización..	24
Figura 4. 2: Distancia media entre civilizaciones extraterrestres avanzadas en función del número de civilizaciones avanzadas.	25
Figura 4. 3: Ampliación de la zona destacada de la figura 3.2. Fuente: propia.	26
Figura 4. 4: Distancia media entre civilizaciones avanzadas en función del número de estrellas.	27
Figura 4. 5: Fracción de población que emigra en función del coeficiente de difusión.	28
Figura 4. 6: Fracción de población que emigra en función de la distancia entre sistemas solares.	29
Figura 4. 7: Fracción de población que emigra en función de la distancia entre sistemas (2ndo caso).	30
Figura 4. 8: Periodo de vida mínimo en función del ratio de formación estrellas. Modelo CyS.	32
Figura 4. 9: Periodo de vida mínimo en función de la tasa de emigración. Modelo CyS.	33
Figura 4. 10: Periodo de vida mínimo según la distancia entre sistemas solares. Modelo CyS.	34
Figura 4. 11: Periodo de vida mínimo en función del ratio formación de estrellas. Modelo ZPG.	35
Figura 4. 12: Periodo de vida mínimo en función de la tasa de emigración. Modelo ZPG.	36
Figura 4. 13: Periodo de vida mínimo según la distancia entre sistemas solares. Modelo ZPG.	37
Figura 4. 14: Velocidad frente de onda de colonización en función de la tasa de emigración.	38
Figura 4. 15: Velocidad del frente de onda de colonización en función de la distancia entre sistemas solares.	39

1. INTRODUCCIÓN

1.1 SITUACIÓN ACTUAL Y CONTEXTO

“Where are they?” (¿Dónde están?) Es la famosa pregunta planteada por Enrico Fermi a finales de la década de los cuarenta [1]. Esta pregunta, convertida en paradoja, se refiere al hecho de que existiendo una gran posibilidad de que haya civilizaciones extraterrestres inteligentes, ¿por qué ninguna ha contactado todavía con nosotros?

La postura de muchos científicos ante la cuestión de vida extraterrestre es la siguiente: La Galaxia contiene miles de millones de planetas habitables como la Tierra, algunos de estos planetas, tal vez, albergan vida. Entonces, es probable que en alguno de estos planetas exista una civilización extraterrestre tecnológicamente avanzada con una tecnología mucho más adelantada que la nuestra. Esta es la conclusión que parece derivarse del principio de mediocridad (la idea de que la Tierra es un planeta normal que orbita alrededor de una estrella como cualquier otra en una región corriente de la Galaxia). Este principio ha sido útil a la ciencia desde los tiempos de Copérnico. Los científicos que adoptan esta postura deben responder a la pregunta de Fermi: Si existen las civilizaciones extraterrestres tecnológicamente avanzadas ¿por qué no están aquí? O ¿Por qué no tenemos ninguna señal de ellas?

Las respuestas son diversas y basadas en razonamientos que van desde lo tecnológico (las leyes de la física no lo permiten, por ejemplo) a lo práctico (se trata de un proceso costoso y difícil) o a lo sociológico (las civilizaciones tecnológicas avanzadas desaparecen antes de poder realizar cualquier aventura colonial).

De todos modos, algunos cálculos [2] sugieren que una civilización tecnológicamente avanzada podría haberse extendido por nuestra Galaxia en algunas decenas de millones de años.

Nosotros en este proyecto, utilizando las ecuaciones que gobiernan la difusión de una población y asumiendo valores "razonables" para los coeficientes de aumento de población y de emigración y para la velocidad de desplazamiento, analizaremos la viabilidad de esta hipótesis.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Para la correcta realización de este trabajo de investigación es importante indicar cuáles son las metas que queremos alcanzar para conseguir una mejor estructuración del proyecto.

El objetivo principal de esta investigación es analizar la viabilidad de la hipótesis ya planteada anteriormente. Para realizarlo, haremos un análisis detallado de las distintas variables y factores necesarios para la realización de todos los cálculos y, utilizando valores razonables para cada uno de estos, poder llegar a unas conclusiones y a una respuesta posible de la hipótesis. En resumen, conseguir una modelización y análisis del aumento y expansión de una especie extraterrestre a escala galáctica

Otro objetivo importante es el diseño de un experimento numérico que sea capaz de confirmar o rebatir la hipótesis; Para lograrlo, se ha realizado una simulación con el programa Matlab capaz de resolver las ecuaciones que analizaremos con parámetros de entrada introducidos inicialmente.

Y finalmente, nos familiarizaremos con algunos problemas relacionados con la búsqueda de vida extraterrestre, donde analizaremos algunos ejemplos extraídos del libro de Stephen Webb. *"If the Universe Is Teeming with Aliens... Where Is Everybody? Seventy-Five Solutions to the Fermi Paradox and the Problem of Extraterrestrial Life"*, el más completo y actualizado sobre esta cuestión [3].

1.3 PRESENTACIÓN DE CARL SAGAN Y WILLIAM I. NEWMAN

Carl Sagan (1934-1996) fue un astrónomo, escritor y divulgador científico estadounidense. Fue profesor en la Universidad de Cornell. Doctorado en astrofísica, estudio los orígenes de los organismos vivos contribuyendo al nacimiento de la exobiología y la búsqueda de vida extraterrestre. Trabajó para la NASA y contribuyó en varios proyectos (misión Voyager) y fue uno de los promotores del proyecto SETI de búsqueda de vida extraterrestre.

William I. Newman es profesor de ciencias de la Tierra, ciencias planetarias y espaciales, y en campos como física y astronomía y matemáticas en la universidad de UCLA.

Juntos escribieron el artículo “*Galactic civilizations: populations dynamics and interstellar diffusion*” [2] en diciembre del 1978 en los laboratorios de los estudios planetarios de la Universidad Cornell en Ithaca, Nueva York.

Este artículo estudia la expansión de civilizaciones galácticas mediante ecuaciones de reacción-difusión no lineales, plantea todas las bases para poder formular la hipótesis y es fundamental para el desarrollo de este proyecto.

1.4 LIBRO DE STEPHEN WEBB

Existe una gran cantidad de libros en el ámbito de la astronomía, los que tratan de estrellas, los de agujeros negros, los que hablan sobre la posible vida extraterrestre, etc. Nosotros aquí hablaremos sobre el último caso, y más concretamente sobre algunos aspectos tratados en el libro “*If the Universe Is Teeming with Aliens... Where Is Everybody? Seventy-Five Solutions to the Fermi Paradox and the Problem of Extraterrestrial Life*” escrito por Stephen Webb en 2002 con la primera versión que contenía 50 soluciones, que han aumentado a 75 en la segunda edición (2015).

En él se plantean distintas soluciones a esta paradoja tan famosa de Fermi. Las soluciones se dividen en 3 grupos:

- Están (o han estado) aquí
- Existen, pero aún no los hemos visto o no tenemos noticias de ellos
- No existen.

Algunas de estas soluciones están descritas en un tono humorístico, pero hay otras de las que podemos extraer conclusiones interesantes. Sobre alguna de estas hablaremos al final del proyecto y veremos si pueden ser posibles o no, ya que están relacionadas con los objetivos del proyecto, incluso alguna puede ayudar a concretar y resolver alguna duda.

1.5 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN CON MATLAB Y SIMULACIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los objetivos de este proyecto es realizar un experimento numérico que sea capaz de llegar a la solución de la hipótesis. Para ello se ha desarrollado una pequeña

aplicación con el programa Matlab, donde se lleva a cabo una simulación de una posible colonización espacial. Esta aplicación contiene todas las ecuaciones necesarias para poder llegar a la solución, y dependiendo de los parámetros de entrada que nosotros introduzcamos, los resultados que obtendremos serán distintos.

También ha sido necesaria para la realización de las gráficas, que veremos a lo largo del trabajo y con las que analizaremos cada uno de los factores que intervienen en las ecuaciones que describen el problema.

2. RESULTADOS OBTENIDOS POR SAGAN Y NEWMAN

Empezaremos viendo y analizando el último punto del artículo ya comentado de Sagan y Newman. Este último apartado del artículo, con el título “Results”, es el que recoge todas las fórmulas y ecuaciones necesarias para la realización del experimento. Plantearemos las fórmulas con valores numéricos normalizados planteados por los propios autores y los razonamientos a los que llegan.

Estos cálculos han sido necesarios para la correcta realización de la aplicación con Matlab, ya que han servido como base para el código y su posterior comprobación de los resultados. Seguidamente de toda la explicación de este apartado, podremos observar cómo los resultados del artículo y los obtenidos con Matlab coinciden.

* Para profundizar y encontrar más información sobre la expansión de civilizaciones galácticas mediante ecuaciones de reacción-difusión no lineales se pueden consultar los archivos de referencia [2].

Dicho esto, vamos a realizar la primera simulación con los valores que usan Sagan y Newman en cada uno de los cálculos para llegar a la conclusión de su artículo.

Empiezan estimando el número aproximado estacionario de civilizaciones más avanzadas que la nuestra en la Vía Láctea. Este número de civilizaciones lo denominaremos N y se puede escribir como:

$$N = f \cdot L \quad (1)$$

Donde L es el tiempo de vida media de la civilización expresado en años y f es un factor que combina la velocidad de formación de estrellas, la fracción de estrellas con sistemas planetarios, el número de planetas ecológicamente adecuados por tal sistema, etc. Nosotros lo llamaremos ratio de formación de estrellas para abreviar y se expresa en años⁻¹. Por lo general, se estima que $f \sim 10^{-1}$ /año, aunque en caso de colonización, la probabilidad de que surja una vida inteligente y una civilización avanzada en un mundo determinado se aproxima a la unidad y este factor f puede ascender hasta $f \sim 10$ /año. Sagan y Newman estiman que N suele tener un valor de 1 millón de civilizaciones.

Con el resultado de N ya pueden resolver la siguiente ecuación, para determinar la distancia media entre civilizaciones avanzadas. Esta se realiza con la suposición de que las estrellas en la Vía Láctea tengan una separación media de 1 pc (un parsec equivale a 3,26 años luz) y asumiendo un total de 250 mil millones de estrellas en nuestra galaxia, la distancia media entre civilizaciones avanzadas es:

$$\Lambda \approx \left(\frac{2,5 \cdot 10^{11}}{N} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{2,5 \cdot 10^{11}}{f \cdot L} \right)^{\frac{1}{3}} pc \quad (2)$$

Realizando los cálculos con los valores ya comentados, obtenemos una distancia media de aproximadamente 63 pc, unos 205 años luz.

Para nuestro problema de difusión dependiente de la densidad con el crecimiento y saturación de la población, hemos encontrado que la velocidad v del frente de colonización puede representarse por:

$$v = \tilde{v}(D\gamma)^{1/2} \quad (3)$$

Donde \tilde{v} es una constante sin dimensiones del orden de la unidad, γ es la tasa de crecimiento de la población y D es el coeficiente de difusión que, multiplicado por el gradiente de densidad de la población, produce el flujo de salida correcto a medida que se acerca a la saturación. Esta fórmula la utilizaremos más adelante en este mismo apartado.

El siguiente factor que estos autores calculan es el de la tasa específica de emigración Ψ ; Se trata de la fracción de la población que emigra por unidad de tiempo al siguiente sistema solar habitable. Esta tasa se encuentra a partir de la relación:

$$\Psi = \frac{P}{\Delta t} = \frac{2mD}{\Delta x^2} \quad (4)$$

Donde P es el valor esperado de la fracción de población que emigrará a otro mundo a una distancia Δx en un tiempo Δt . Definimos Δt como el intervalo de tiempo entre aventuras coloniales sucesivas. Y m es un valor sin unidades que representa el número de dimensiones. Este artículo realiza los cálculos en el universo tridimensional, el planteamiento más popular para tratar estos aspectos, y por eso el valor de m será de 3.

Los autores llegan a la conclusión de que es imposible hacer estimaciones realistas de Ψ para civilizaciones extraterrestres; deducen que los valores muy altos deben ser excesivamente costosos y los valores muy bajos no pueden proporcionar un alivio a corto plazo de la presión demográfica en la periferia de la zona donde se ha desarrollado esa civilización. Entonces toman como ejemplo la historia de la humanidad, hasta llegar a suponer que el valor de Ψ esta entre $[10^{-8}, 10^{-4}]$ /año, con un sesgo hacia el valor más pequeño para una civilización interestelar más joven.

Por otro lado, la gran abundancia de sistemas solares en nuestra galaxia, con muchos planetas en la zona de habitabilidad (La zona de habitabilidad es la zona de un sistema planetario en la que el agua se puede mantener en estado líquido en la superficie de los planetas que se encuentren en esa zona. Se acostumbra a asumir que son zonas de posible desarrollo de vida basada en carbono), hace que Sagan y Newman se planteen a qué distancia media están separados. Finalmente adoptan un valor para Δx^2 entre $[3, 10^3] pc^2$ para la distancia media entre estos, con un valor preferido de $10pc^2$.

Haciendo una reconversión de la formula anterior y usando los valores usualmente otorgados para Ψ y Δx^2 , de 10^{-8} /año y $10pc^2$ respectivamente y con un valor de 3 para m , encontramos que el valor típico del coeficiente de difusión D es $1,67 \cdot 10^{-8}pc^2/año$, aproximadamente unos $5 \cdot 10^{21}cm^2/segundos$, un coeficiente de difusión enorme para los estándares de atmósferas planetarias.

Después de la realización de todos estos cálculos, Sagan y Newman ya están listos para examinar la aparente ausencia de colonias extraterrestres en la Tierra. Sea t_{min} el tiempo mínimo para que la civilización técnica avanzada más cercana a nosotros nos alcance a una velocidad de frente de onda de difusión v , por definición, $v \cdot t_{min} = \Lambda$. Si $t_{min} > L$ (recordemos que L es el periodo de vida medio de las civilizaciones avanzadas), no debería haber tales colonias extraterrestres en la Tierra. En consecuencia, hay un periodo de vida crítico para una civilización que navega por el espacio pueda alcanzarnos. Se trata de L_c , y se puede definir como

$$L_c = t_{min} = \frac{\Lambda}{v} \quad (5)$$

Para que la Tierra haya sido colonizada, la civilización colonial debe tener un periodo de vida mayor a L_c .

Antes de seguir, hay que aclarar un par de aspectos que se tratan en el artículo de Sagan y Newman. A lo largo de todo el artículo, se diferencian dos modelos de civilización, uno donde se tiene en cuenta el crecimiento local y saturación de la población y el otro donde se practica el ZPG (zero population growth, es una condición de equilibrio demográfico donde el número de personas en una población específica no crece ni disminuye). Por lo que es de suponer que cada modelo tendrá un valor de L_c distinto. Como ya hemos comentado, para profundizar más sobre este aspecto, véase la referencia [2].

Sigamos con el planteamiento de resultados. Combinando todo lo anterior (ecuaciones (2), (3), (4) y (5)), se encuentra que para poblaciones con crecimiento local y saturación, el periodo de tiempo de vida crítico es:

$$L_c = 3,3 \cdot 10^7 (f/0,1)^{-1/4} [(\gamma/10^{-4})(\Psi/10^{-8})(\Delta x^2/10)]^{-3/11} \text{ años} \quad (6)$$

Como comparación, para una población practicando ZPG y para un frente de onda térmica con $N = 2$, encontramos que el periodo de tiempo de vida crítico es:

$$L_c^{ZPG} = 1,3 \cdot 10^{10} (f/0,1)^{-8/11} (\Delta x^2/10)^{-12/11} (\Psi/10^{-8})^{-3/11} \text{ años} \quad (7)$$

Los parámetros libres, $f, \gamma, \Delta x^2$ y Ψ tienen valores estándar normalizados, con la distancia medida en pc y el tiempo en años.

Ahora hemos obtenido la vida útil crítica para cada modelo. Desde la ecuación para el modelo de crecimiento y saturación, vemos que L_c aumenta a medida que γ disminuye. En general se obtiene una transición suave entre nuestros dos modelos, conforme γ disminuye, L_c aumenta hasta que asume el valor dado por el modelo de ZPG.

Sagan y Newman después de estos cálculos llegan a la siguiente reflexión: Vemos que para que la colonización por parte de la civilización tecnológica más cercana haya alcanzado la Tierra, el tiempo de vida de esa civilización debe exceder los 30 millones de años para la difusión no lineal con crecimiento y saturación. Tal civilización habrá estado intensamente ocupada en la colonización de más de 200.000 sistemas planetarios antes de llegar a la Tierra, a unas 64 pc de distancia. Por tanto, podemos imaginar que muchas civilizaciones expandiéndose simplemente por difusión

ocuparían solo un insignificante volumen de la galaxia, y ni si quiera llegaría a la siguiente civilización más cercana, tengan o no ambiciones coloniales.

Si se observa un ZPG estricto la situación es aún peor, L_c es del orden de la edad del universo y sería poco probable que observáramos tal población. Las variaciones en f seguramente aumentarán la vida útil crítica, mientras que las variaciones en Ψ tendrán un efecto casi insignificante. Por lo tanto, el ZPG estricto explica fácilmente nuestra falta de observación de las civilizaciones extraterrestres cercanas y limitaremos nuestras consideraciones restantes a casos que incluyen el crecimiento y saturación de la población.

Nuestras conclusiones para el caso de difusión dependiente de la densidad con crecimiento y saturación de la población parecen ser insensibles a la elección de los parámetros de entrada. Las variaciones razonables en f , que permitan una colonización extensa, cambian L_c por un factor ~ 3 . Creemos que γ no puede ser mucho más grande que $10^{-4}/\text{año}$ para ser consistente con las presiones de población muy poderosas que cualquier imperio colonial debe haber experimentado antes en su historia que en el tiempo de la colonización interestelar. (Además, un posible medio de transporte interestelar, el “barco de generación” en el que llega una generación de colonos mucho más tardía que la que originalmente se estableció). Δx^2 puede ser tan grande como 10^3pc^2 , lo que significa que los colonos deben avanzar una gran distancia antes de establecer una colonia. Ψ posiblemente podría ser más grande que $10^{-8}/\text{año}$ aunque los valores mucho más grandes parecen prohibitivos para el vuelo espacial interestelar.

Pero incluso adoptando: $\Delta x^2 = 10^3 \text{pc}^2$ y $\Psi = 3 \cdot 10^{-4}/\text{año}$, encontramos que $L_c \sim 10^5 \text{años}$. Incluso con esfuerzos masivos de colonización interestelar la Tierra no habría sido visitada a menos que la civilización colonizadora fuera muy longeva.

La velocidad efectiva del frente de onda de colonización está dada por:

$$v = 1,2 \cdot 10^6 [(\gamma/10^{-4})(\Psi/10^{-8})(\Delta x^2/10)]^{1/2} \text{pc/año} \quad (8)$$

Esta velocidad es la velocidad mínima que ha de tener el frente de onda para que la civilización más cercana llegue a la Tierra previa su extinción. Esta es la única combinación posible entre $\gamma, \Delta x^2$ y Ψ con unidades de velocidad. Con valores

nominales para las variables anteriores, el frente de onda de colonización tiene una velocidad efectiva de $1,2 \cdot 10^{-6}$ pc/año considerablemente más lenta incluso que las velocidades interestelares del Pioneer 10 y 11 y las naves espaciales Voyager 1 y 2 [4].

Después de la realización de estos cálculos, Sagan y Newman dicen que las civilizaciones más antiguas, del orden de miles o decenas de miles de millones de años, sí podrían haber alcanzado actualmente la Tierra. Sin embargo, por razones de la evolución de la sociedad tan avanzada creen que la motivación para la colonización puede haber cambiado completamente, y que la ciencia y tecnología de dicha civilización pueden ser extremadamente diferentes de cualquier cosa que podamos reconocer o imaginar.

Por lo anterior, encontramos que solo las civilizaciones con tiempo de vida mayor a 10^6 años pudieron haber iniciado una aventura colonial con un frente de onda alcanzando la Tierra desde el sistema estelar más cercano con una civilización técnica avanzada. La vida de las civilizaciones técnicas extraterrestres son altamente inciertas, pero muchos investigadores coinciden [2] en la hipótesis de que solo una pequeña fracción de civilizaciones sobrevive más allá de 10^6 años. Y es que son muchos los factores que pueden hacer desaparecer una especie, ya sea por la autodestrucción de la sociedad o por catástrofes naturales. Fijémonos en el vecindario solar, es muy poco probable que haya estrellas con planetas habitables que sean más antiguas que el Sol. Además, hay que tener en cuenta el periodo de tiempo que transcurre desde el inicio de vida en un planeta hasta el desarrollo de una civilización con un cierto punto de avance tecnológico, y este tiempo, cogiendo como ejemplo el del planeta Tierra con nosotros, puede ser varias veces mayor a los mil millones de años. Es por eso que es bastante probable que no hayan civilizaciones con un periodo de vida mayor a 10^7 en nuestro vecindario solar.

Sagan y Newman en el artículo realizan una clasificación interesante de las civilizaciones, según su periodo de vida. Las jóvenes con menos de 10^6 años y las viejas con más de 10^6 años. Las civilizaciones viejas es poco probable que sean potencias coloniales ya que conforme aumenta la edad de la civilización, las razones y la motivación por la colonización van disminuyendo. Las civilizaciones jóvenes pueden embarcarse en grandes aventuras coloniales, pero en comparación con el volumen de la Vía Láctea, éstas son de un alcance muy limitado. Puede haber imperios de

decenas o incluso cientos de miles de mundos, pero es inverosímil que exista un Imperio Galáctico; simplemente hay demasiados mundos por conquistar.

Es interesante especular sobre la probabilidad de que dos civilizaciones se encuentren en el espacio, donde una, con fan de colonizar, llegue a un planeta donde se encuentra establecida otra especie de civilización avanzada.

Tenemos que para una distribución aleatoria y uniforme de civilizaciones, la probabilidad p de una interacción entre civilizaciones será:

$$p \leq (d/\Lambda)^3 \quad (9)$$

Donde sabemos que Λ es la distancia media entre civilizaciones avanzadas y d es el valor medio máximo ocupado por una civilización en expansión colonial (o imperio estelar), calculada como

$$d = vL = \tilde{v}(D\gamma)^{\frac{1}{2}}L \quad (10)$$

Y usando las ecuaciones (2), (5), (9) y (10) encontramos:

$$p \leq (L/L_c)^4 \quad (11)$$

Para $L < L_c$. Vemos que la probabilidad de que dos civilizaciones interactúen es despreciable a menos que $L \approx L_c$. Este argumento depende de que las civilizaciones crezcan de manera independiente de sus vecinos.

De donde concluyen que si el tiempo de vida de una civilización necesario para que pueda entrar en contacto con otra es de 10^7 años y si suponemos todas las civilizaciones con $L = 10^6$ años, solo 1 entre 10^4 civilizaciones interactuarán. Si volvemos a suponer que $N = 10^6$, entonces ~ 100 interactuaran en algún momento dado. Si disminuimos a $L = 10^5$ años, entonces solo 1 de 10^8 civilizaciones interactuará, y finalmente si $N < 10^6$ no se produciría interacción.

Sagan y Newman finalizan el artículo puntualizando que podría ser que el frente de onda de colonización de la civilización más cercana a nosotros esté a pocos cientos de años de alcanzarnos; y que las recientes emisiones electromagnéticas producidas por

radares militares y astronómicos y, especialmente, la televisión comercial marcándonos como una civilización técnica emergente, pueda provocar una acción en dicha civilización colonial; dependiendo de la disposición de su cercanía, sus colonias y de lo cuidadosamente que estén examinando el espectro de radio en modo escucha, la fuga o emisión de radiación puede estimular una misión exploratoria en un corto periodo de tiempo.

Así, la respuesta a la pregunta "¿Dónde están?" Puede ser que sea que sólo ahora estén por llegar.

3. RESULTADOS OBTENIDOS CON MATLAB

Ahora con la aplicación que hemos desarrollado en Matlab para las ecuaciones de difusión realizaremos los cálculos que acabamos de ver en el punto anterior. Introduciremos los distintos valores para cada variable, y los compararemos con los resultados que obtienen Sagan y Newman en su artículo.

Los scripts necesarios para la realización de esta simulación están disponibles en la parte de anexos al final del trabajo (Anexo A).

La pantalla de salidas de Matlab mostraría lo siguiente:

```
Ingrese el tiempo de vida media de las civilizaciones avanzadas: 100000
Ingrese el factor de ratio formación de las estrellas: 10
El número de civilizaciones avanzadas en nuestra galaxia es de 1000000
La distancia media entre civilizaciones avanzadas es 62.9961 pc (aprox
205.3671 años luz)
Ingrese la fracción de población que emigra al siguiente sistema solar: 10^-8
Ingrese el número de dimensiones: 3
Ingrese la distancia a la que se encuentra el siguiente sistema solar: 10
La fracción de población que emigra por unidad de tiempo al siguiente sistema
solar es 1e-08/año
El coeficiente de difusión es 1.6667e-08 pc^2/año (5.031666666666668e+21
cm^2/segundos)
Ingrese la tasa de crecimiento de la población: 10^-4
El periodo de vida mínimo para una civilización con crecimiento y saturación
es 10435516.2786 años
El periodo de vida mínimo para una civilización con crecimiento poblacional
cero es 456454925.448 años
La velocidad efectiva del frente de onda de colonización es: 1.2e-06 pc/año
El tamaño medio del radio máximo ocupado por una civilización en expansión
colonial es: 0.12 pc
La probabilidad de interacción entre dos civilizaciones avanzadas es menor o
igual a 8.4323e-09
```

Ingresando los valores para L , f , Ψ , m , Δx^2 y γ , cuando estos sean solicitados, el mismo programa ya resuelve las ecuaciones mostrando las soluciones en forma gráfica.

Podemos observar como usando los valores usualmente otorgados a las variables, los resultados son los mismos que obtiene Sagan y Newman en su artículo; eso significa

que la aplicación para Matlab está bien configurada y ya puede ser utilizada para otros ejemplos utilizando otros valores, a libre elección por el usuario, para cada variable. Que es precisamente lo que haremos ahora.

Realizaremos la misma serie de cálculos pero con distintos valores y compararemos los resultados obtenidos. Primero usaremos los valores mínimos de cada variable y luego los máximos. Hemos visto cada uno de sus parámetros en el apartado anterior.

Pero antes, aclarar que utilizaremos los mismos valores para L , m y γ que los propuestos por Sagan y Newman en el apartado anterior. Porque L se trata del tiempo de vida medio de las civilizaciones extraterrestres tecnológicamente avanzadas y otorgando un valor estándar los resultados que se obtienen son mucho más viables y es que tanto si le otorgamos un valor muy bajo como muy alto, los resultados pueden quedar alterados. En el caso de m utilizaremos el mismo valor de 3 por la tridimensionalidad del universo. Y para γ la tasa de crecimiento poblacional más viable es la propuesta por ellos en su artículo.

Dicho esto, tenemos que para f , Ψ y Δx^2 sus valores mínimos son 0,1, $10^{-8}/\text{año}$ y 3pc^2 respectivamente. Y con $L = 100.000$, $m = 3$ y $\gamma = 10^{-4}$, introduciendo los valores en la aplicación de Matlab, la pantalla de salida muestra lo siguiente:

```
Ingrese el tiempo de vida media de las civilizaciones avanzadas: 100000
Ingrese el factor de ratio formación de las estrellas: 0.1
El número de civilizaciones avanzadas en nuestra galaxia es de 10000
La distancia media entre civilizaciones avanzadas es 292.4018 pc (aprox
953.2298 años luz)
Ingrese la fracción de población que emigra al siguiente sistema solar: 10^-8
Ingrese el número de dimensiones: 3
Ingrese la distancia a la que se encuentra el siguiente sistema solar: 3
La fracción de población que emigra por unidad de tiempo al siguiente sistema
solar es 1e-08/año
El coeficiente de difusión es 5e-09 pc^2/año (1.5095e+21 cm^2/segundos)
Ingrese la tasa de crecimiento de la población: 10^-4
El periodo de vida mínimo para una civilización con crecimiento y saturación
es 51831463.2275 años
El periodo de vida mínimo para una civilización con crecimiento poblacional
cero es 48345552633.5241 años
La velocidad efectiva del frente de onda de colonización es: 6.5727e-07 pc/año
El tamaño medio del radio máximo ocupado por una civilización en expansión
```

Colonización de la Galaxia por una civilización extraterrestre tecnológicamente avanzada

Adrián Rodríguez Mota

colonial es: 0.065727 pc

La probabilidad de interacción entre dos civilizaciones avanzadas es menor o igual a $1.3856e-11$

Y para valores máximos, que son 10, 10^{-4} y 1000 para f , Ψ y Δx^2 respectivamente y con $L = 100.000$, $m = 3$ y $\gamma = 10^{-4}$, la pantalla de salida de Matlab muestra:

```
Ingrese el tiempo de vida media de las civilizaciones avanzadas: 100000
Ingrese el factor de ratio formación de las estrellas: 10
El número de civilizaciones avanzadas en nuestra galaxia es de 1000000
La distancia media entre civilizaciones avanzadas es 62.9961 pc (aprox
205.3671 años luz)
Ingrese la fracción de población que emigra al siguiente sistema solar: 10^-4
Ingrese el número de dimensiones: 3
Ingrese la distancia a la que se encuentra el siguiente sistema solar: 1000
La fracción de población que emigra por unidad de tiempo al siguiente sistema
solar es 0.0001/año
El coeficiente de difusión es 0.016667 pc^2/año (5.031666666666667e+27
cm^2/segundos)
Ingrese la tasa de crecimiento de la población: 10^-4
El periodo de vida mínimo para una civilización con crecimiento y saturación
es 58683.2205 años
El periodo de vida mínimo para una civilización con crecimiento poblacional
cero es 243596.265 años
La velocidad efectiva del frente de onda de colonización es: 0.0012 pc/año
El tamaño medio del radio máximo ocupado por una civilización en expansión
colonial es: 120 pc
La probabilidad de interacción entre dos civilizaciones avanzadas es menor o
igual a 8.4323
```

Si comparamos los datos más relevantes, podemos ver como, por ejemplo, la distancia media entre civilizaciones para valores mínimos es casi 5 veces mayor que para valores máximos. El coeficiente de difusión para mínimos es un valor muy pequeño, en cambio para máximos este valor está mucho más cerca de uno. Ambos periodos de vida crítico mínimo para que la civilización más cercana a nosotros llegue a la Tierra (distinguimos los dos modelos de población) son muchísimo más largo para mínimos que para máximos. Y finalmente podemos ver como la velocidad efectiva del frente de onda de colonización para valores máximos es mucho más grande que para mínimos.

También he realizado una pequeña simulación para Matlab más sencilla pero con la que podemos realizar un experimento un tanto curioso. Con esta simulación podemos encontrar el tiempo que tardaría una civilización tecnológicamente avanzada en colonizar la Vía Láctea y el universo visible desde la Tierra (operamos sobre el visible desde la Tierra porque no podemos saber el tamaño del universo porque este se va expandiendo a cada momento). El script utilizado para este experimento está disponible en el apartado de Anexos (Anexo B).

El radio de la Vía Láctea es de 52.850 años luz y el límite del universo visible desde la Tierra está situado a 46.500 millones de años luz [5], en todas las direcciones; si cogemos de referencia la Tierra situada en el centro de ambos espacios, podemos calcular el tiempo que tardaría el frente de onda de colonización en llegar a los límites de ambos suponiendo que se va expandiendo de forma uniforme en todas las direcciones.

Utilizando los valores normalizados para cada factor, los resultados obtenidos por Matlab mostrarían lo siguiente:

```
Valores nominales de cada variable respectivamente: 10^-4, 10^-8, 10
Ingrese el valor de la tasa de crecimiento de población: 10^-4
Ingrese la fracción de población que emigrara al siguiente sistema solar:10^-8
Ingrese la distancia a la que encuentra el siguiente sistema: 10
La velocidad efectiva del frente de onda de colonización es: 1.2e-06 pc/año
El tiempo que tardaría la civilización en colonizar la Vía Láctea seria:
13503252022.5495 años
El tiempo que tardaría la civilización en colonizar todo el universo visible
seria: 1.188081776818455e+16 años
```

Donde podemos ver que tardaríamos más de 13,5 mil millones de años en colonizar la Vía Láctea y para el universo visible desde la Tierra es muchísimo más tiempo, más de $1,18 \cdot 10^{16}$ años. Periodos de tiempo demasiado largos para una especie.

4. REPRESENTACIÓN DE GRÁFICAS Y VARIABLES

En este apartado realizaremos la simulación con Matlab del planteamiento que hemos visto en el primer apartado. Con la ayuda de esta herramienta podremos crear una gráfica para cada ecuación donde podremos dar distintos valores a cada factor y analizar cómo se comporta cada uno y cómo afecta en el resultado con la intención de extraer unas conclusiones interesantes que podrán explicar lo que sucedería en casos hipotéticos. Todos los archivos de Matlab utilizados para realizar estas gráficas están en Anexos (Anexo C).

Empezamos con la primera fórmula del apartado anterior (1), la que determina el número de civilizaciones avanzadas en la Vía Láctea. Para esta fórmula, veremos como varía el número de civilizaciones avanzadas (N) variando el tiempo de vida media de las civilizaciones (L). Hemos realizado la siguiente simulación con un valor para L de 1 a 100.000 años, que es el valor estándar usado por Sagan y Newman en su artículo y un valor de 10/año para f .

La gráfica resultante es la siguiente:

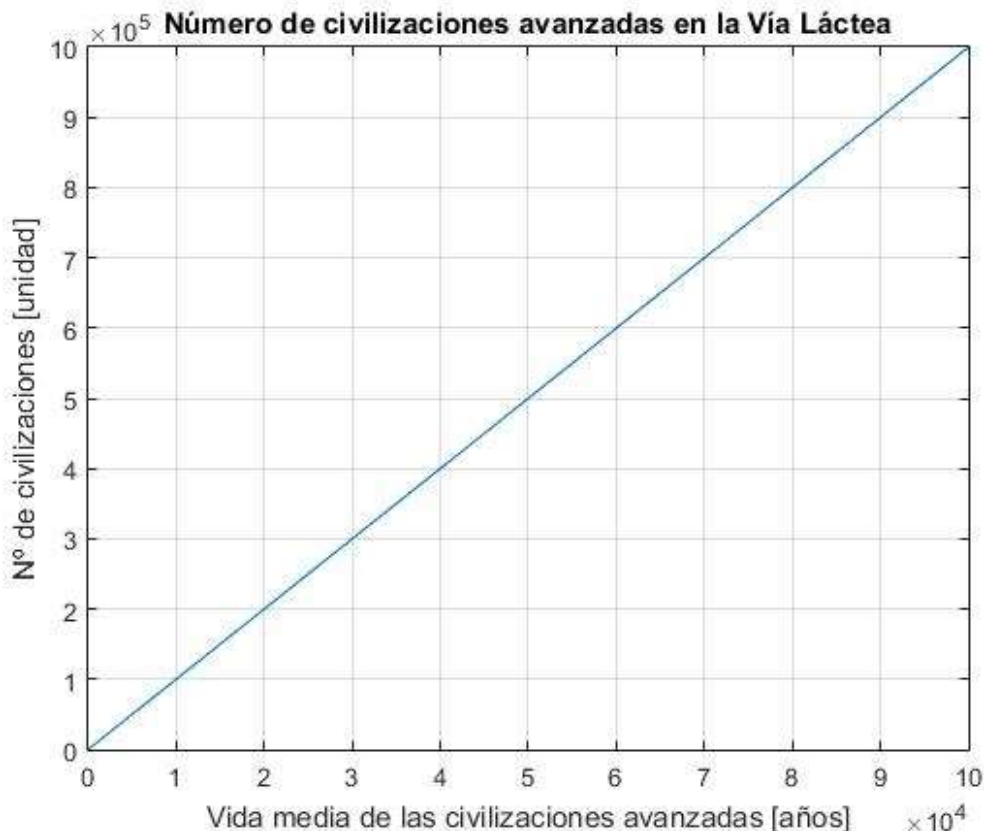


Figura 4. 1: Número de civilizaciones extraterrestres en la Vía Láctea en función del tiempo de vida medio de una civilización. Fuente: propia.

Obtenemos una gráfica lineal, donde cuanto mayor sea el valor de L mayor será el número de civilizaciones avanzadas. Si hiciéramos lo mismo con el otro factor que aparece en la fórmula, el de ratio de formación de estrellas f , obtendríamos el mismo resultado, a mayor ratio, mayor número de civilizaciones avanzadas. De estos resultados podemos concluir que es algo lógico; aparecen nuevas civilizaciones a cierto ritmo y las civilizaciones existentes se extinguen cada vez más tarde, por lo tanto, con el transcurso del tiempo, habrá un mayor número de civilizaciones.

La siguiente fórmula que analizaremos es la que determina la distancia media entre civilizaciones avanzadas (2). Sobre esta fórmula analizaremos cómo varía el resultado de la distancia media entre civilizaciones avanzadas (1) a medida que aumentamos la cantidad de civilizaciones que hay en la galaxia (N). Este valor de N irá de 1, donde solo habría una civilización avanzada en nuestra galaxia, hasta 1 millón de civilizaciones, valor estándar normalmente otorgado y usado en el artículo.

La gráfica de este análisis es la siguiente:

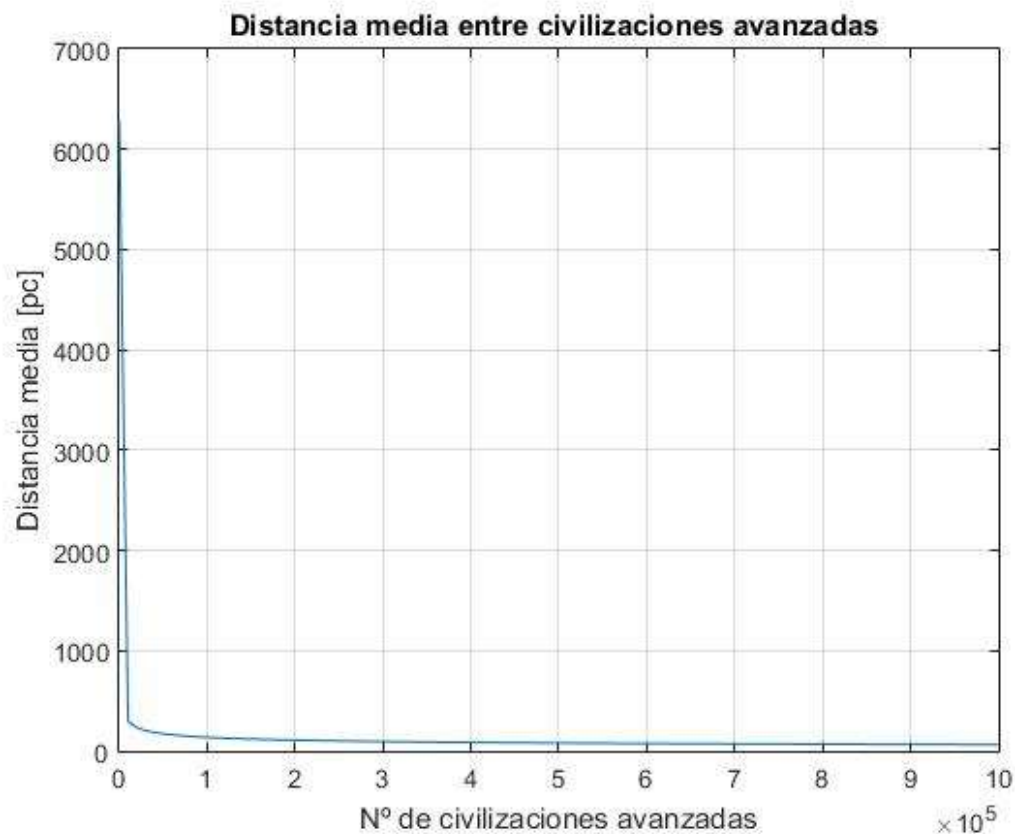


Figura 4. 2: Distancia media entre civilizaciones extraterrestres avanzadas en función del número de civilizaciones avanzadas. Fuente: propia

Podemos observar cómo la distancia es muy elevada para valores relativamente pequeños de civilizaciones, llegando a superar los 6000pc para una sola civilización avanzada. Pero esta se va reduciendo rápidamente hasta cuando N obtiene un valor de aproximadamente 10.000 civilizaciones, donde la distancia media se estabiliza con un valor aproximado a los 300pc y empieza a ser un valor constante menor a 200pc. Lo veremos mejor en la siguiente figura, donde hacemos un zoom a la zona de la gráfica donde Δ pasa de tener valores muy elevados a obtener un valor constante a medida que aumenta el número de civilizaciones

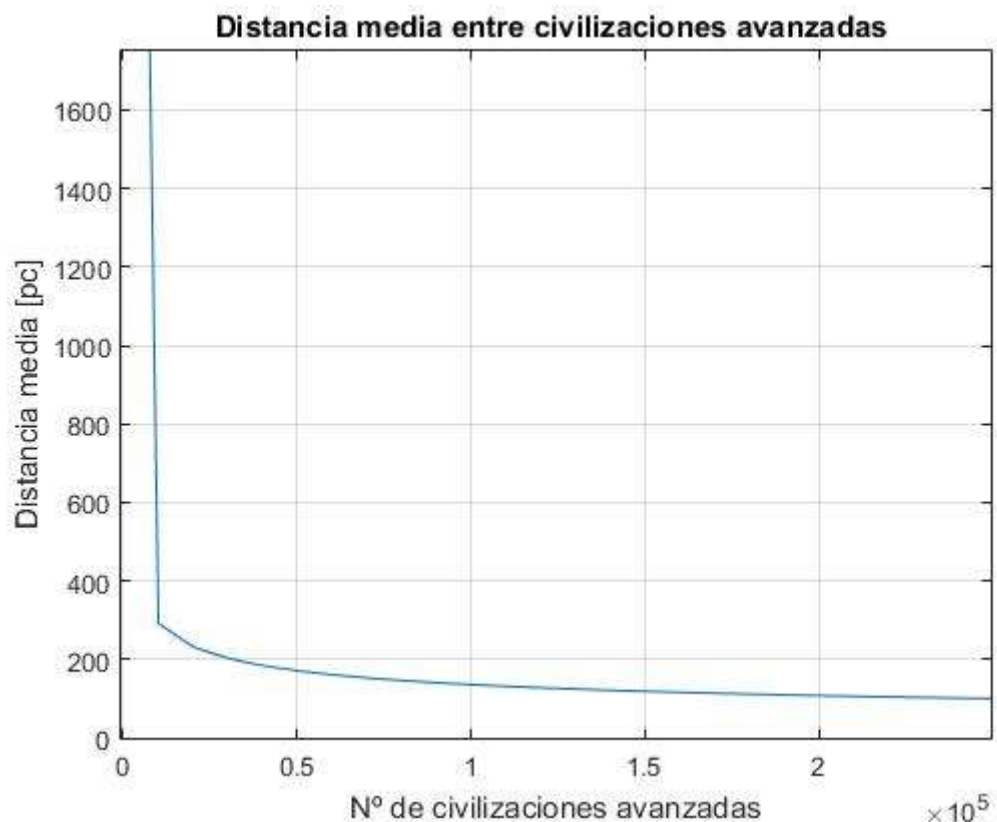


Figura 4. 3: Ampliación de la zona destacada de la figura 3.2. Fuente: propia.

Estas gráficas dan resultados lógicos, ya que a valores relativamente pequeños de N , añadir una civilización más reduce drásticamente la distancia media. En cambio, cuando ésta llega a un cierto punto, en este caso las 10.000 civilizaciones, añadir más civilizaciones apenas variará el valor de la distancia media.

Realizaremos un segundo análisis sobre esta fórmula. Ahora iremos aumentando el número de estrellas en nuestra galaxia y veremos cómo influye esto sobre la distancia media entre las civilizaciones avanzadas.

Sabemos que el número de estrellas en nuestra galaxia es fijo, pero si lo extrapolamos haciendo que esta cantidad varíe entre valores desde 1 millón (1 estrella mínima por civilización avanzada) hasta 250 mil millones, que es la cantidad aproximada de estrellas en nuestra galaxia, la distancia media entre civilizaciones avanzadas varía como se muestra en la figura 3.4:

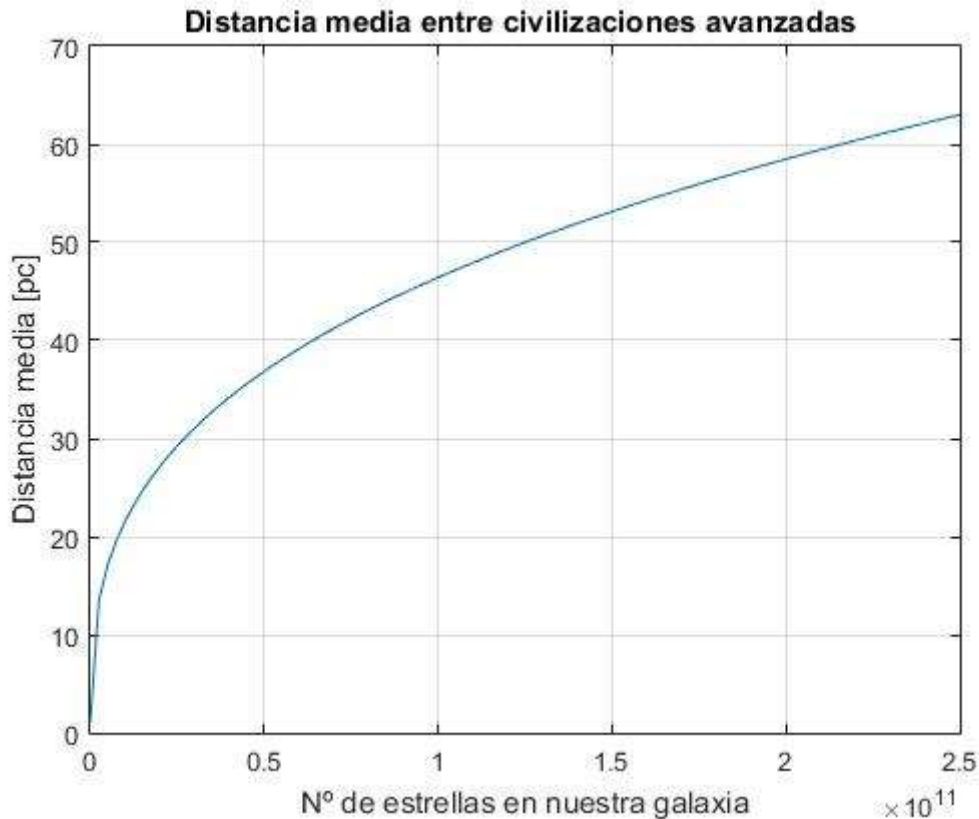


Figura 4. 4: Distancia media entre civilizaciones avanzadas en función del número de estrellas.
Fuente:propia

Observamos que obtenemos una gráfica exponencial. Da un resultado lógico, a mayor número de estrellas, mayor es la distancia media entre civilizaciones. Observamos que para 1 millón de estrellas la distancia media es de 1 pc y para las 250 mil millones de estrellas, obtenemos un valor de aproximadamente 63 pc de distancia media, resultado que nos da el análisis en el artículo.

Continuaremos con la fórmula (4) que determina la fracción de población que emigra por unidad de tiempo al siguiente sistema solar (Ψ). En ella veremos cómo varía el valor de la fracción de población cuando variamos los valores del coeficiente de difusión (D) y el valor de la distancia entre sistemas solares (Δx^2).

En la primera gráfica, veremos como varia el valor de Ψ a medida que aumentamos el valor del coeficiente de difusión. Realizaremos la gráfica con valores para Δx^2 de 10 pc^2 , que es el valor predilecto, y para D valores cambiantes que van desde $5 \cdot 10^{-9}$ hasta $0,05$.

La grafica resultante se muestra en la figura 3.5.

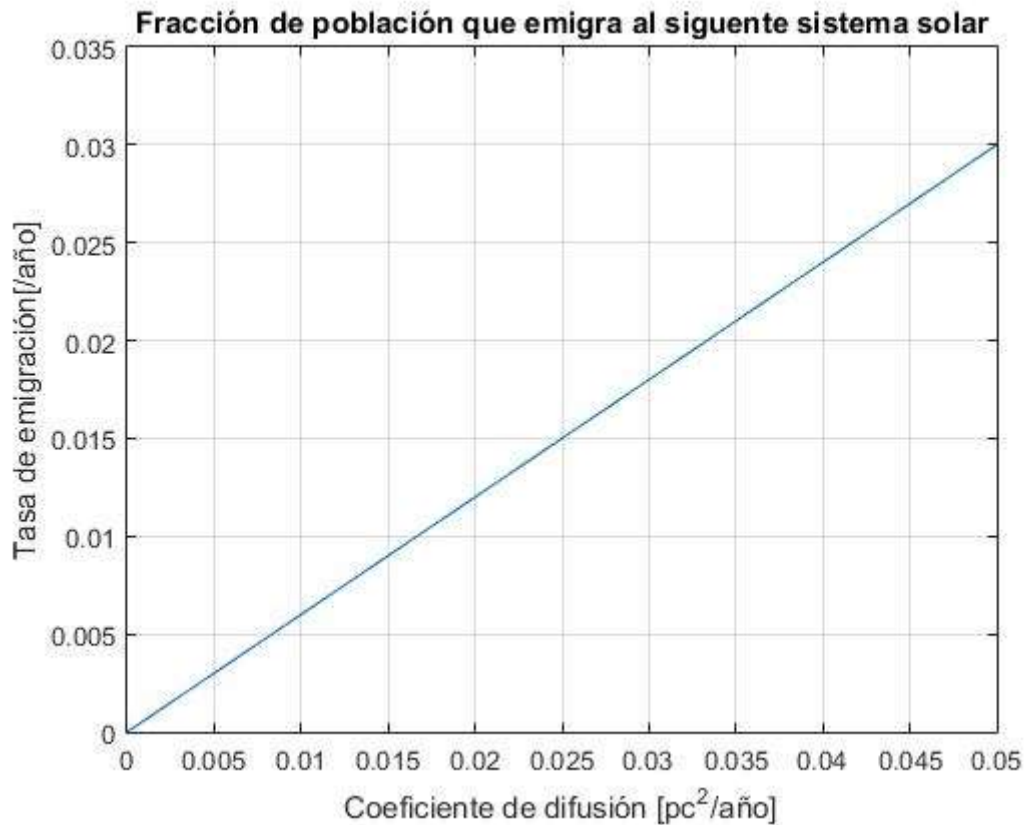


Figura 4. 5: Fracción de población que emigra en función del coeficiente de difusión. Fuente: propia.

Podemos ver que se trata de una ecuación lineal, es decir, si el coeficiente de difusión es mayor, la tasa de emigración también aumentara, y a la inversa.

Para la segunda gráfica, variaremos la distancia media entre sistemas solares y veremos cómo influye respecto al valor de la tasa de emigración. Realizaremos la gráfica con valores para D de $1,67 \cdot 10^{-8} \text{ pc}^2/\text{año}$, valor encontrado en el apartado de simulación Sagan y Newman, y Δx^2 variante desde 3 hasta 1000. La gráfica que obtenemos se muestra en la figura 3.6:

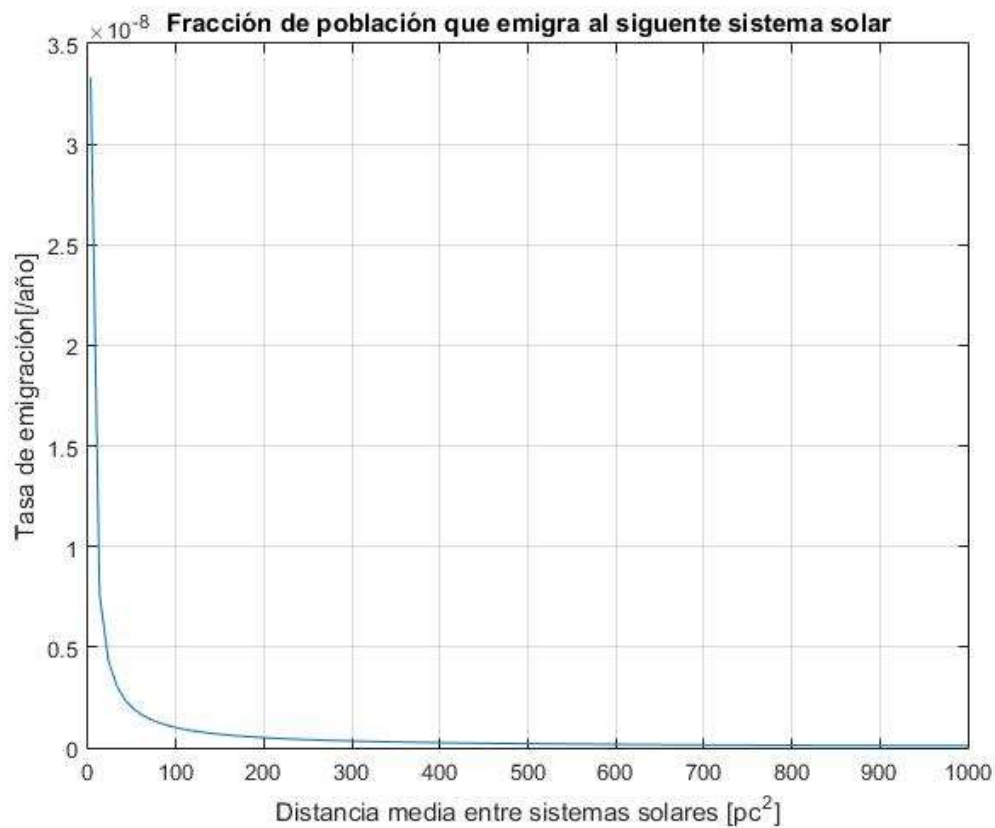


Figura 4. 6: Fracción de población que emigra en función de la distancia entre sistemas solares. Fuente: propia.

Donde podemos observar que la tasa que emigra por unidad de tiempo es extremadamente elevada si la distancia media entre sistemas solares es de valores inferiores a la decena. Podemos observar que no es hasta el punto donde Δx^2 es del valor de $10pc^2$ que la tasa de emigración no se estabiliza. Esto lo veremos más claro en la siguiente gráfica, la figura 7.

Sabiendo que el valor predilecto para la distancia media entre sistemas solares es de $10pc^2$, podemos realizar otra grafica donde el valor limite no se aleje tanto como en el anterior analisis para poder observarla mejor. La siguiente gráfica muestra la tasa de emigración pero ahora el parametro de Δx^2 va desde 3 hasta 100.

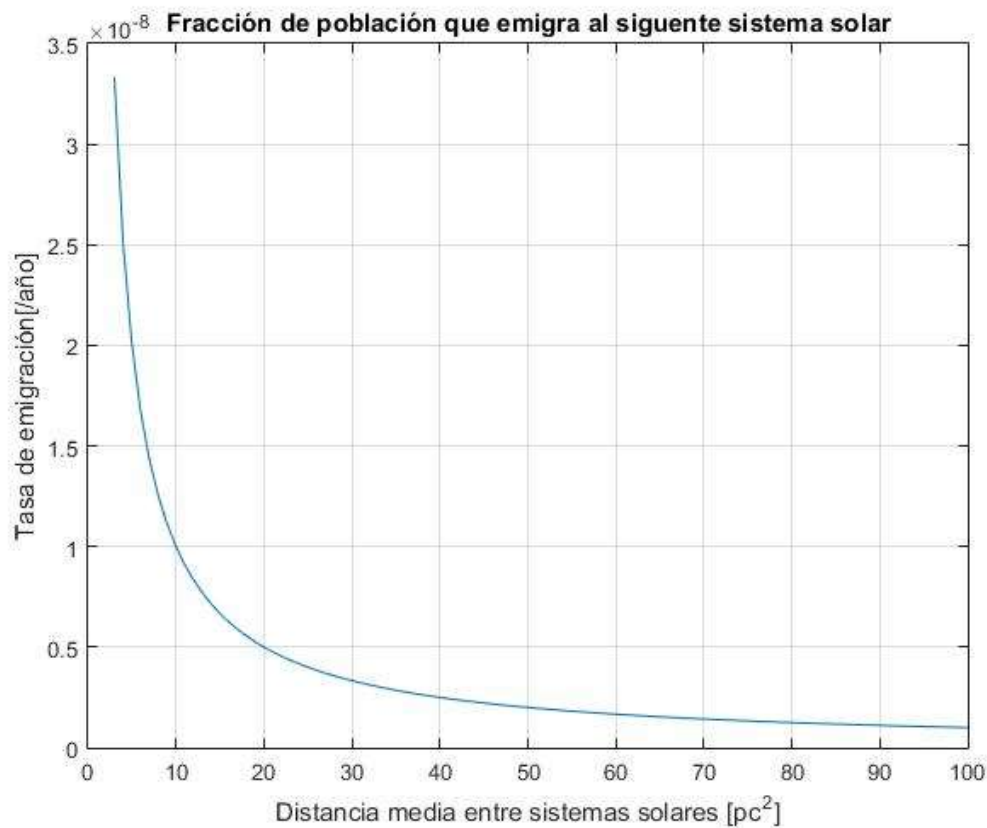


Figura 4. 7: Fracción de población que emigra en función de la distancia entre sistemas (2ndo caso).
Fuente: propia.

En esta gráfica se observa con más claridad el punto donde esta se estabiliza, en ese punto encontramos el valor de Δx^2 que es de $10 pc^2$ como ya hemos dicho y un valor de 10^{-8} para la tasa de emigración de la población por unidad de tiempo, que es el valor que se adopta para una civilización interestelar más joven.

Este resultado nos deja bien claro que a mayor distancia entre los sistemas solares, la tasa de emigración por unidad de tiempo disminuye.

Ahora empezaremos a analizar las fórmulas que examinan la aparente ausencia de colonias extraterrestres en la Tierra. Analizaremos los resultados y gráficas que obtendremos de ellas y extraeremos las conclusiones que creamos oportunas.

Las dos siguientes fórmulas que analizaremos (6) y (7) son las que determinan el periodo de vida mínimo crítico para que la civilización más cercana a nosotros llegue a alcanzarnos, se trata de L_c . Como ya hemos explicado anteriormente, aquí distinguimos dos modelos, el primero que tienen en cuenta el crecimiento local y saturación de la población y el segundo que practica el ZPG (zero population growth)

donde durante un periodo de tiempo no hay variación en el número de población. Para ambos veremos cómo influye cada parámetro.

Empezaremos por el modelo con crecimiento local y saturación de la población. Esta ecuación está formada por 4 factores, ellos son el ratio de formación de estrellas (f), la fracción de emigración por unidad de tiempo (Ψ), el coeficiente de crecimiento poblacional (γ) y la distancia media entre sistemas solares (Δx^2).

Para tres de ellos, excluyendo el factor γ porque siempre es un valor fijo en los ejemplos, realizaremos una gráfica donde veremos cómo influye cada uno sobre el periodo de vida crítico. Es decir, el factor que estudiaremos, será variante y obtendrá valores entre sus parámetros posibles, mientras que los demás tendrán sus valores nominales correspondientes. Los valores nominales los podemos encontrar en el capítulo anterior donde analizábamos los resultados obtenidos por Sagan y Newman en su artículo.

Si nos fijamos en la fórmula previamente, nos podemos dar cuenta y deducir que más o menos conseguiremos gráficas parecidas, ya que todos los factores que analizaremos se encuentran multiplicándose entre ellos.

Empezaremos analizando el valor que obtiene L_c cuando variamos el valor de f . Sabemos que este factor puede tener un valor entre 0,1 y 10. Entonces realizaremos la gráfica variando f para cada valor entre 0,1 y 10. La gráfica que obtenemos es la siguiente.

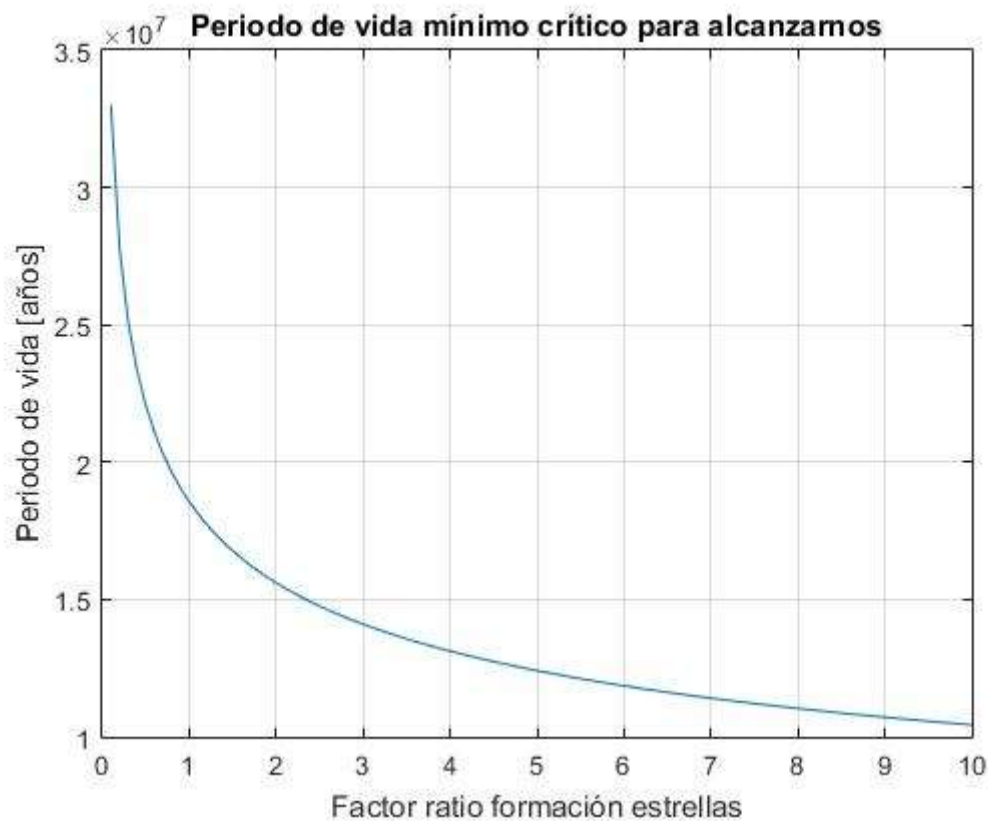


Figura 4. 8: Período de vida mínimo en función del ratio de formación estrellas. Modelo CyS. Fuente: propia

Vemos como obtenemos una gráfica exponencial, donde el periodo de vida mínimo necesario para que la civilización nos alcance va disminuyendo a medida que aumenta el ratio de formación de estrellas. De este resultado podemos concluir que a mayor cantidad de estrellas en la Galaxia con sistemas planetarios adecuados para la vida extraterrestre, es más probable que tengamos una civilización avanzadas más cercanas a nosotros, por lo que tal civilización necesitaría menos tiempo para alcanzarnos. En cambio si este ratio es del valor mínimo, podemos observar como la civilización más cercana a nosotros necesitaría tener una vida muy longeva para llegar a alcanzarnos, ya que esta sería muy probable que se encontrara a una gran distancia de nosotros.

Para el siguiente análisis de los valores que obtiene L_c según sus factores, variaremos el valor de Ψ . Sabemos que este factor puede tener un valor entre 10^{-8} y 10^{-4} . Entonces realizaremos la gráfica variando Ψ para cada valor entre ambos valores. La gráfica que obtenemos es la siguiente



Figura 4. 9: Periodo de vida mínimo en función de la tasa de emigración. Modelo CyS. Fuente: propia.

Vemos como volvemos a obtener una gráfica exponencial, donde el periodo de vida mínimo necesario para que la civilización nos alcance va disminuyendo a medida que aumenta la tasa de emigración de la población. Podemos afirmar que a mayor tasa de emigración, la civilización realizará una mayor cantidad de aventuras coloniales y estas podrán abarcar más superficie de la Galaxia pudiendo llegar a una mayor cantidad de planetas, entre ellos la Tierra. Y es que si se producen más aventuras coloniales, es más probable que lleguen a la Tierra más rápidamente y por lo tanto el periodo de vida mínimo crítico para que una civilización nos alcance se reduce.

Para el siguiente análisis de los valores que obtiene L_c según sus factores, variaremos el valor de Δx^2 . Sabemos que este factor puede tener un valor entre 3 y 1000pc^2 . Entonces realizaremos la gráfica variando Δx^2 para cada valor entre ambos valores. La gráfica que obtenemos es la siguiente

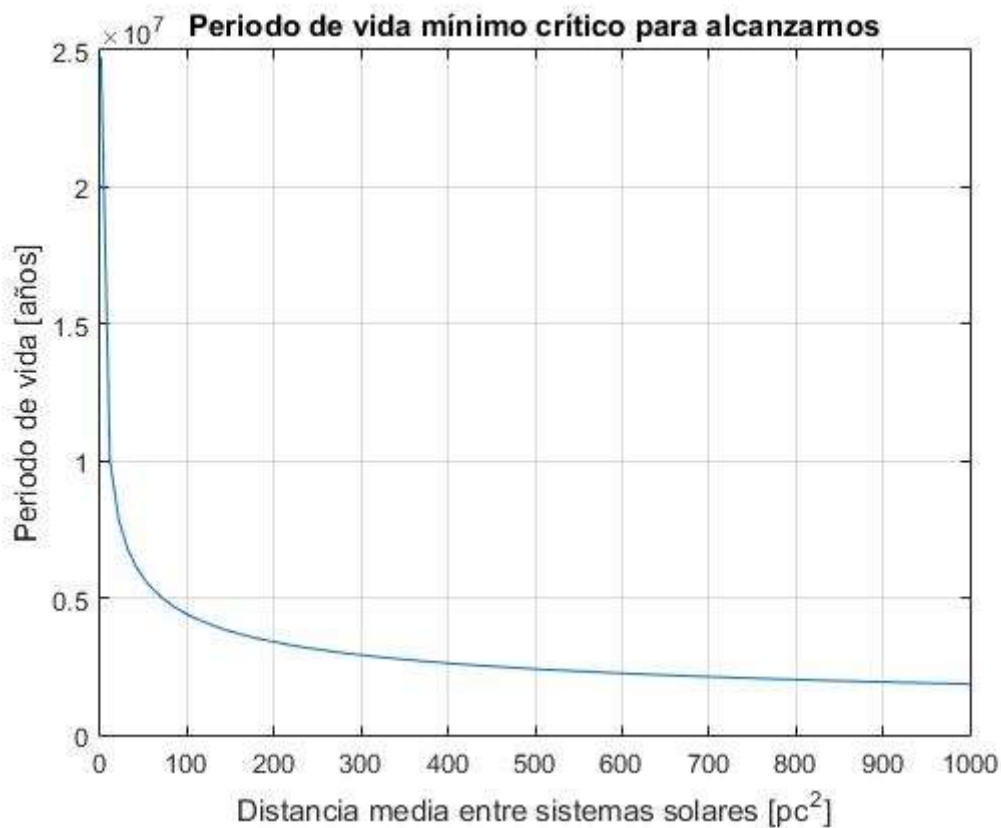


Figura 4. 10: Periodo de vida mínimo según la distancia entre sistemas solares. Modelo CyS. Fuente: propia.

Vemos cómo para este caso también obtenemos una gráfica exponencial, donde el periodo de vida mínimo necesario para que la civilización nos alcance va disminuyendo a medida que aumenta la distancia media entre sistemas solares. Si hacemos uso de la lógica, como más distancia haya entre sistemas solares, más tiempo se necesitara para recorrer toda la distancia que separa a los sistemas, es por eso que la gráfica da resultados contradictorios, porque si hay más distancia entre sistemas solares, la aventura colonial tardará más tiempo en llegar a la Tierra desde el sistema solar origen, lo que en consecuencia hace aumentar el tiempo de vida mínimo crítico para que tal civilización colonizadora llegue a la Tierra.

Ahora veremos el segundo modelo, el que practica el ZPG, un crecimiento cero de la población. Esta fórmula es un poco distinta a la del modelo anterior, en esta no aparece el coeficiente de crecimiento de la población como es de esperar. Entonces tendremos que analizarla respecto los siguientes parámetros; el ratio de formación de estrellas f , la fracción de emigración por unidad de tiempo Ψ y la distancia media entre sistemas solares Δx^2 .

Es de imaginar que obtendremos unas gráficas muy similares, y las conclusiones que extraemos de cada una también serán iguales. De todos modos, adjuntare las gráficas para poder observar el resultado y se analizaran más brevemente.

Empezaremos analizando el valor que obtiene L_c cuando variamos el valor de f . Ya conocemos que el valor que puede tener este factor esta entre 0,1 y 10. Entonces realizaremos la gráfica variando f para cada valor entre 0,1 y 10. La gráfica que obtenemos es la siguiente.

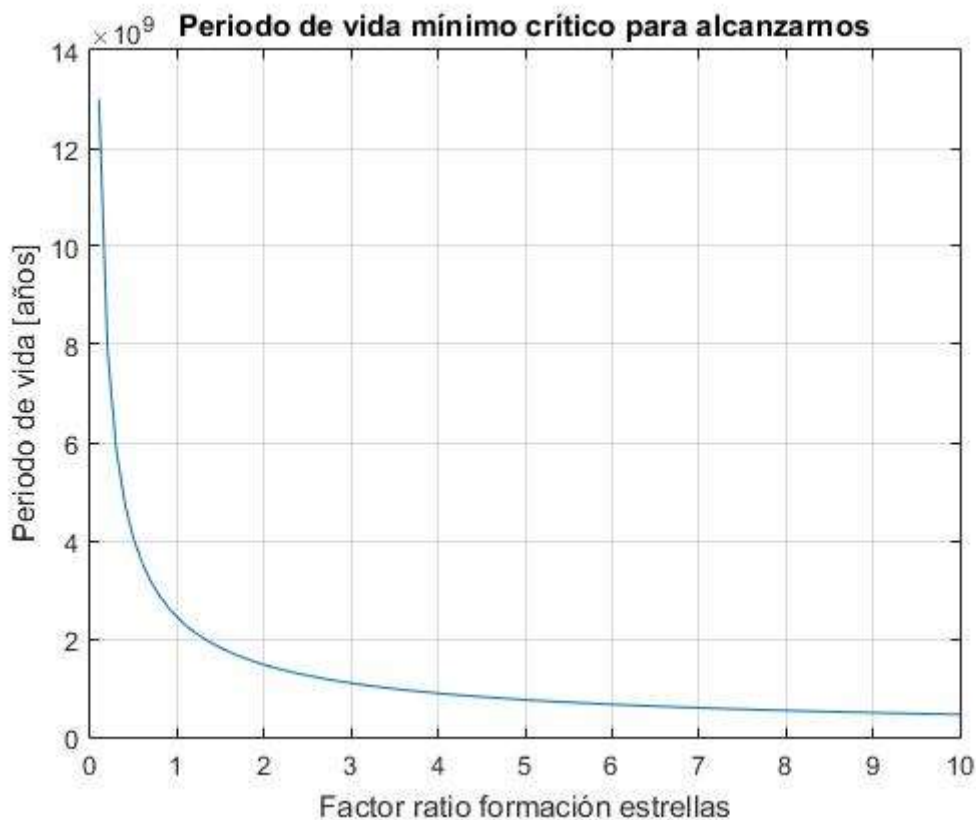


Figura 4. 11: Periodo de vida mínimo en función del ratio formación de estrellas. Modelo ZPG. Fuente: propia.

Podemos observar que volvemos a obtener una gráfica exponencial, donde el periodo de vida mínimo necesario para que la civilización nos alcance va disminuyendo a medida que aumenta el ratio de formación de estrellas.

Y podemos extraer la misma explicación, a mayor ratio, mayor probabilidad de que exista una civilización avanzada más cerca de nosotros y por lo tanto, que necesite menos tiempo en llegar a la Tierra. Pero haciendo una comparativa rápida de cada gráfica para cada modelo, vemos como en esta la curva es más pronunciada, el ángulo es más cerrado.

Seguiremos ahora con el análisis pero variando, como hemos hecho anteriormente, el valor de Ψ . Sabemos que este factor puede tener un valor entre 10^{-8} y 10^{-4} . Realizaremos la gráfica variando Ψ para cada valor entre ambos valores. La gráfica que obtenemos es la siguiente

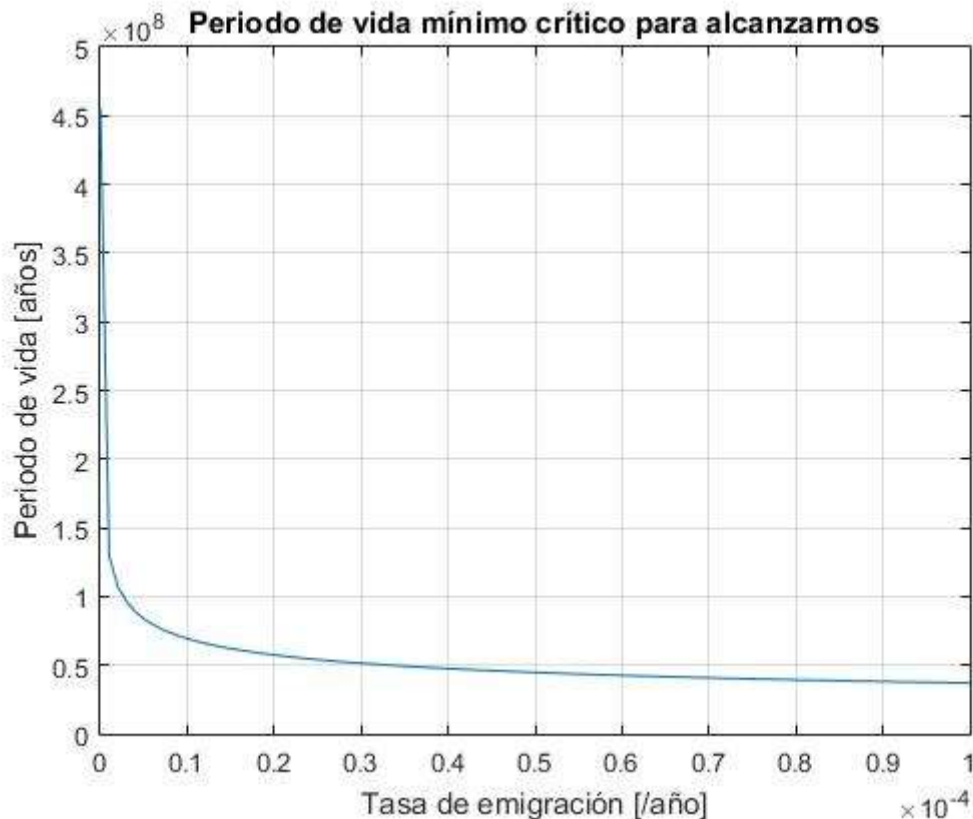


Figura 4. 12: Periodo de vida mínimo en función de la tasa de emigración. Modelo ZPG. Fuente: propia.

Obteniendo otra vez una gráfica exponencial, con el mismo caso, cuanto mayor sea la tasa de emigración menor será el periodo de vida mínimo crítico para que la civilización más cercana a nosotros nos alcance. Las conclusiones y razonamientos que podemos extraer son los mismos que para el modelo anterior.

Si comparamos ambas gráficas, dejando de lado el valor de las unidades, ya que en este modelo el valor del periodo de vida es bastante más inferior que el obtenido para el otro modelo, ambas curvas son muy similares, empiezan con un valor muy alto y este disminuye muy rápidamente hasta que se estabiliza.

Y la tercera y última variable se trata de Δx^2 . Y como ya sabemos con anterioridad, este factor puede tener un valor entre 3 y 1000 pc^2 . Entonces realizaremos la gráfica variando Δx^2 para cada valor entre ambos. La gráfica obtenida está a continuación:

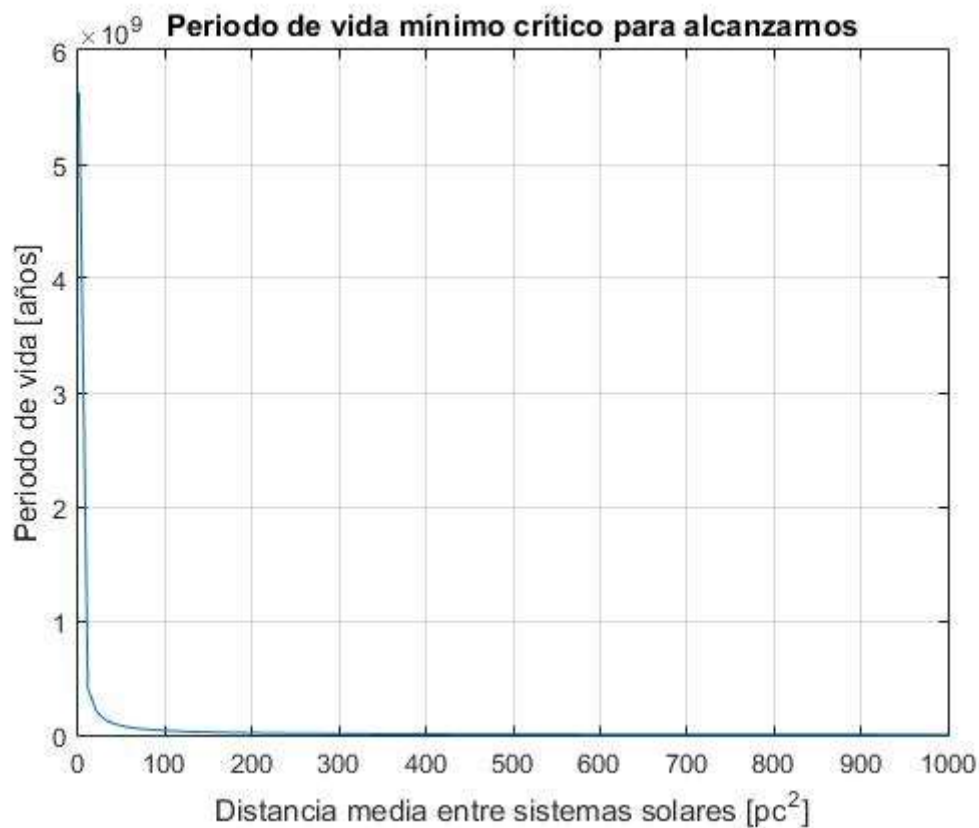


Figura 4. 13: Periodo de vida mínimo según la distancia entre sistemas solares. Modelo ZPG.
Fuente:propia.

Y como vemos, volvemos a obtener resultados contradictorios.

Si comparamos ambas gráficas, posiblemente sea ésta la que más diferencias presenta. En la gráfica de este modelo vemos como el periodo de vida baja prácticamente de manera vertical hasta alcanzar un valor constante un poco mayor a 0. En cambio en la del otro modelo, en el que tenemos en cuenta el crecimiento y saturación de la población, también baja drásticamente de forma vertical, pero no se estabiliza tan cerca del valor 0.

La última ecuación que analizaremos en este apartado es la que determina la velocidad efectiva del frente de onda de colonización (8). Para esta ecuación realizaremos dos gráficas para ver como varia el valor de la velocidad v en función de la tasa de emigración Ψ y en función de la distancia entre sistemas solares Δx^2 .

La primera, la realizaremos utilizando valores nominales para Δx^2 de $10pc^2$ y para γ el valor de 10^{-4} , variaremos el valor de Ψ entre sus parámetros de 10^{-8} a 10^{-4} . La gráfica que obtenemos es la siguiente:

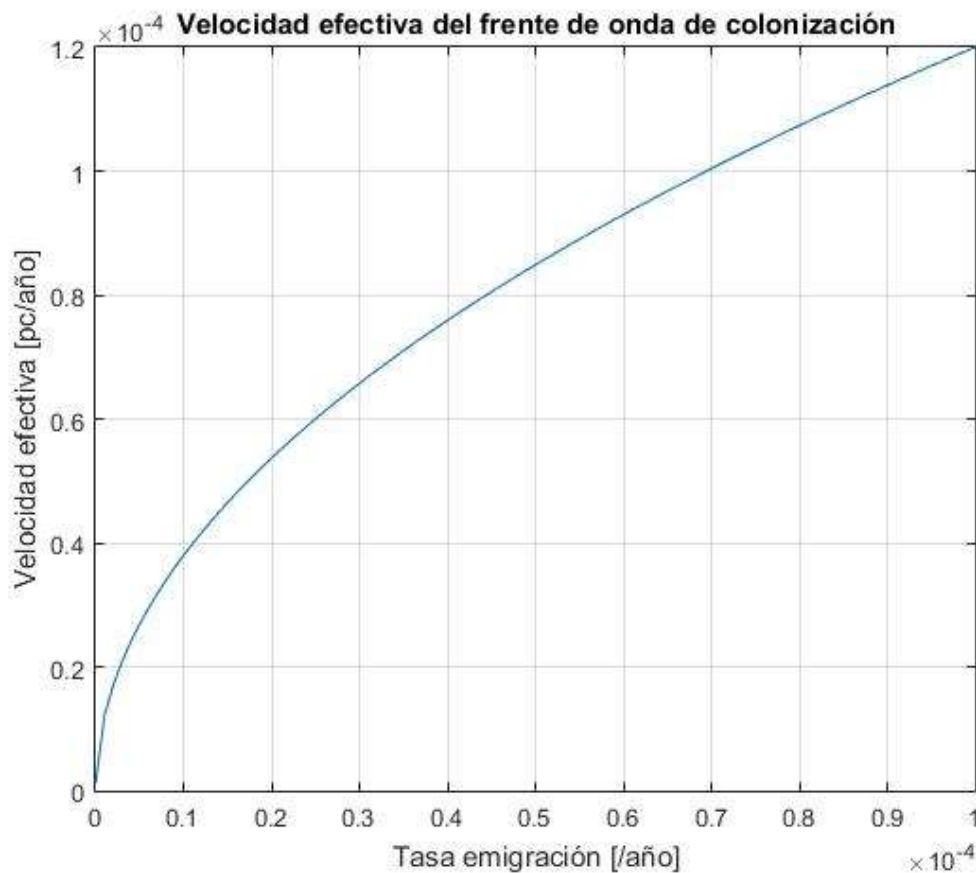


Figura 4. 14: Velocidad frente de onda de colonización en función de la tasa de emigración. Fuente: propia

Observamos que obtenemos una gráfica exponencial. Podemos apreciar que cuanto mayor es la tasa de emigración mayor es la velocidad efectiva. Esto tiene una explicación ya que a mayor tasa de emigración se realizan más aventuras coloniales. Cada aventura colonial avanza hacia una dirección distinta, eso quiere decir que el rango de colonización se va expandiendo por todos los lados por donde se realizan estas aventuras. Es por eso, que la velocidad efectiva de la onda de colonización crece exponencialmente.

Para el segundo análisis, veremos como varia el valor de la velocidad efectiva en función de la distancia entre sistemas solares. Dando valores para Δx^2 de $3pc^2$ a $1000pc^2$, y valores de $\gamma = 10^{-4}$ y $\Psi = 10^{-8}$, obtenemos la siguiente gráfica:

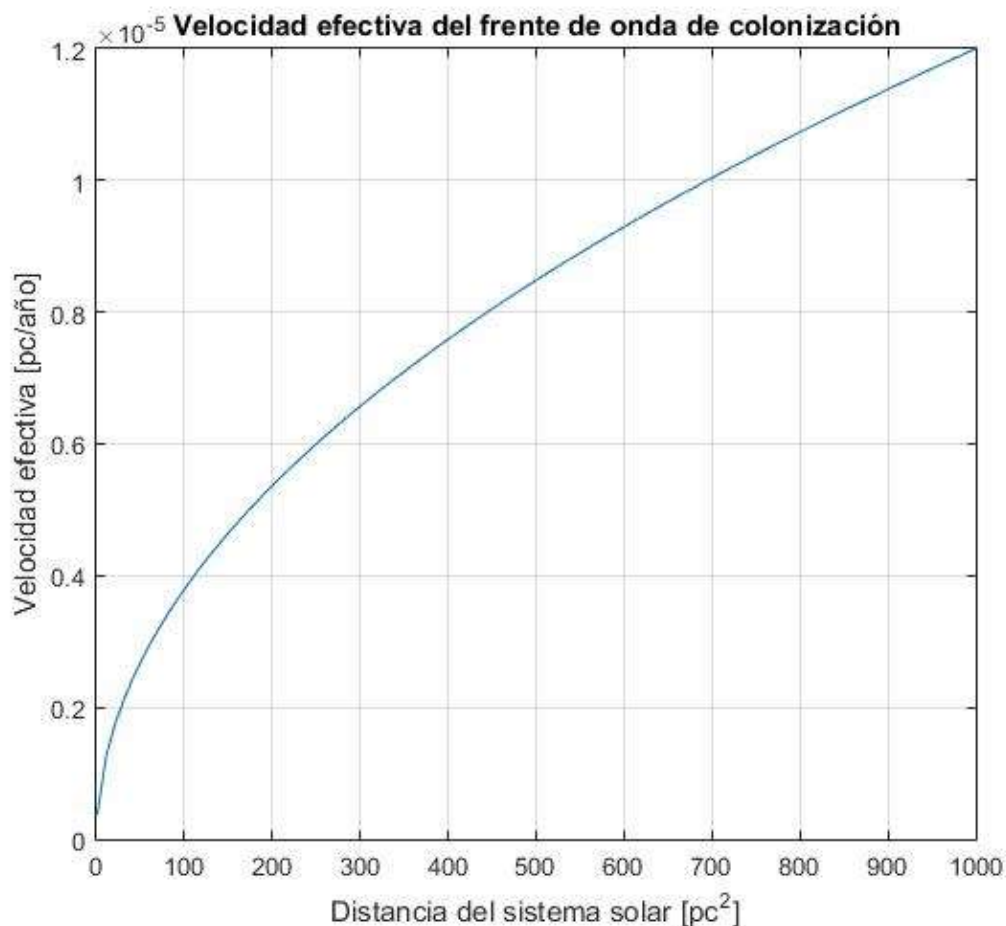


Figura 4. 15: Velocidad del frente de onda de colonización en función de la distancia entre sistemas solares. Fuente: propia.

También obtenemos una gráfica exponencial, con el mismo patrón, cuanto mayor sea la distancia entre sistemas solares, mayor será la velocidad efectiva del frente de onda de colonización. Y se trata de una explicación similar a la dada en el anterior caso; Cuando mayor sea la distancia entre sistemas solares, la región que ocupe la colonización en el espacio también será más grande, y como se ira expandiendo por cada lado, la velocidad efectiva será de mayor valor.

Llegados a este punto, nos quedarían por analizar las fórmulas que tratan sobre la posibilidad de encuentros entre dos civilizaciones. Pero no vemos necesario realizar ninguna gráfica ya que obtendríamos resultados simples con gráficas lineales, donde cuanto mayor sea el valor de cada variable de la formula, tanto de la vida media de las civilizaciones como el número de estas, mayor será la posibilidad. En el punto donde explicamos el artículo de Sagan y Newman, ellos ya realizan este análisis y extraen conclusiones incluso con valores numéricos.

5. EL PROBLEMA DE LA VIDA EXTRATERRESTRE CON STEPHEN WEBB

Como hemos explicado en la introducción, podemos analizar y relacionar alguna de las soluciones propuestas en este libro ya que están relacionadas directamente con lo que hemos visto.

Este libro trata aspectos muy interesantes, y sabía que podía ayudarme con la realización de la memoria de este proyecto.

Aunque el libro presenta soluciones para los tres grupos, aquí nos centraremos en 3 soluciones para el grupo donde expone que existen, pero aún no los hemos visto o no tenemos noticias de ellos. He seleccionado las tres de este grupo porque es el que mejor puede encajar con el tema del proyecto y como veremos, las tres soluciones tienen relación con la hipótesis que planteamos y con el artículo de Sagan y Newman, incluso en una de ellas cita a estos autores.

Pero no adelantemos acontecimientos y empecemos con la primera solución.

Esta solución, con el título “Solución 11: Las estrellas están muy lejos” en el libro, trata de explicar la dificultad de los viajes interestelares: o viajas rápido o el viaje dura mucho.

El hecho en sí de que las estrellas estén tan lejos unas de otras no convierte en imposible los viajes interestelares. Lo cierto es que se puede construir una nave capaz de salir de un sistema planetario y de viajar por el espacio interestelar.

El problema recae en que con la tecnología actual, aun no somos capaces de poder acercarnos a una velocidad viable. Por ejemplo las sondas enviadas, que se mueven a velocidades típicas de decenas de miles km/h [4], tardarían decenas de miles de años en conseguir alcanzar las estrellas más cercanas, tiempo muy elevado para realizar una aventura colonial.

Una de las ideas propuestas para intentar solucionar este problema es la nave generacional. Una nave auto contenida de movimiento lento que en la práctica construiría el mundo entero para sus pasajeros. Tras despegar del planeta origen, muchas generaciones de pasajeros vivirían y morirían antes de que la nave llegara a su destino.

Sin embargo, parece claro que habría que construir una nave capaz de viajar a una fracción considerable de la velocidad de la luz si queremos llegar a las estrellas en un tiempo razonable. Y aún así, la duración de los viajes sería larga a escala de una vida humana. Es por eso que se habla de la probabilidad que hay de que una especie inteligente desarrolle técnicas para efectuar viajes interestelares a velocidades razonables. (Con razonable se refiere a cualquier velocidad que permita que una misión alcance estrellas cercanas en un intervalo de temporal de cientos de años, dentro del rango temporal de una nave generacional).

Stephen Webb presenta las distintas tecnologías que se han propuesto para que el viaje espacial pueda ser una realidad. Pondremos el ejemplo de 3:

La primera propuesta es la de un cohete con motor de propulsión de antimateria. La segunda se trata de un estatorreactor capaz de desplazarse gracias al hidrogeno que absorbería del mismo espacio y la tercera se basa en una vela láser; se trata de una vela inmensa sujeta a una nave espacial y un láser gigante impulsaría esta vela hacia las estrellas.

Para conocer las otras propuestas y obtener más información, véase [2], capítulo, Solución 11: Las estrellas están muy lejos.

La segunda solución que veremos es la “Solución 12: No han tenido tiempo de llegar hasta nosotros”. Esta solución explica los distintos modelos de colonización espacial de una civilización tecnológica avanzada que han ido surgiendo con el paso del tiempo para cada autor, astrofísico, etc.

Entre ellos destacamos, como no podría ser de otro modo, el de Sagan y Newman, también el desarrollado por Eric Jones [6], que presentaba un modelo en el que la colonización estaba regida por el crecimiento demográfico, y el presentado por Bjørk [7], que creó un modelo muy detallado de exploración de la Galaxia basado en enviar sondas “huésped” a diferentes estrellas y una vez llegado al destino, cada sonda lanzara 8 sondas menores para visitar las estrellas que aún no se han explorado.

Los distintos modelos revelan que se pueden dar argumentos a favor de cualquiera de las dos opciones. Se puede defender que el viaje interestelar es lento y caro, que las civilizaciones extraterrestres tecnológicas no han llegado hasta nosotros porque no

han tenido tiempo para lograrlo. Pero también se puede argumentar que el viaje interestelar es rápido y barato para una civilización con una tecnología muy avanzada. Webb acaba el capítulo citando textualmente que le gustaría pensar que nuestros descendientes idearán maneras de explorar la Galaxia a escalas temporales razonables. Y, si nosotros fuéramos capaces de hacerlo, también pudieron lograrlo otros en el pasado. Han tenido miles de millones de años para llegar hasta nosotros. Es tiempo suficiente.

Y la última solución que veremos es la titulada “Solución 16: Cambian de opinión”. Basada en el posible cambio de pensamiento de colonización que puede tener una civilización con el paso de los años.

Se cree que el establecimiento de una colonia humana en algún planeta remoto requeriría un mínimo de 100 mil años. ¿Es probable que alguna cultura permanezca estable después de tantos años y, además, que siga destinando una gran cantidad de recursos a un plan de expansión? Webb concluye diciendo que hasta las culturas más longevas y sólidas reordenan sus prioridades en algún momento. Incluso es posible que hasta dejen de lado la idea de una colonización a gran escala.

Claudius Gros ha desarrollado algunas ecuaciones simples [8] que muestran el comportamiento de las civilizaciones técnicas avanzadas y la posibilidad de que éstas puedan cambiar de actitud.

Lo que este estudio planeta es que las colonias, por la razón que sea, pueden desistir de la colonización; y a la inversa, las civilizaciones estancadas puede, por cualquier razón, decidir retomar la expansión. Gros revela que es posible que una civilización extraterrestre con una gran población alcance un equilibrio estable. Gros acaba reflexionando y haciendo un paralelismo de comportamientos con los humanos, si nosotros en algunos milenios conseguimos mantenernos estables y dejamos de tener ese afán de explorar, es probable que alguna civilización extraterrestre también llegue a ese punto.

Con estas tres soluciones podemos hacernos una idea sobre la multitud de posibles hipótesis que nos podemos plantear sobre este tema. Para muchas que aparecen en el libro todavía no son ni imaginables pero quien sabe si en unos años, seremos capaces de poder comprobar más de alguna.

6. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha utilizado principalmente el artículo escrito por C. Sagan y W. I. Newman para desarrollar toda la investigación. Se trata de un documento con gran importancia en el mundo astrofísico sobre el tema tratado. En él se establecen las bases para poder analizar la viabilidad de la hipótesis planteada al inicio, la que sugería que una civilización tecnológicamente avanzada podría haberse extendido por nuestra Galaxia en algunas decenas de millones de años.

Se ha realizado el análisis de todas las ecuaciones que se tienen en cuenta en el proceso y de ellas se han podido extraer algunas conclusiones interesantes. Se ha analizado en que afecta cada factor de las ecuaciones y la repercusión que tiene en el resultado.

Se ha diseñado y desarrollado una aplicación con Matlab para resolver las distintas ecuaciones y realizar gráficas para valores introducidos por el usuario al instante. Puede ser utilizado en próximos experimentos donde las ecuaciones difusión-reacción sean la base de un movimiento.

Sobre la posible solución a la hipótesis, puede quedar resumida en una frase. Solamente una especie muy longeva en el tiempo (superior a 10^8 años) y con una gran motivación por colonizar nuevos mundos, sería capaz de llegar a la Tierra. Y él porque es simple: hay demasiados mundos por colonizar y una gran distancia que recorrer.

Sobre las líneas futuras en este ámbito, yo veo un mundo de posibilidades. Empezando por la multitud de estudios que se pueden realizar sobre la población, como el control de tasas de crecimiento para que la evolución de la especie sea la más eficiente, la cantidad de población que puede albergar una región sin que se vea afectada la zona, una mejora de gestión de los recursos, etc. O el desarrollo de nuevas técnicas para el viaje interestelar, o conseguir que éste sea más barato. El desarrollo de nueva tecnología para mejorar la búsqueda de vida extraterrestre, nuevos proyectos de las agencias espaciales (NASA, ESA), etc.

AGRADECIMIENTOS

Quiero mostrar mi agradecimiento a aquellas personas que estuvieron presentes en la realización de este proyecto, tanto directa como indirectamente.

Mi más sincero agradecimiento a mi tutor Manel, por enseñarme el camino para la correcta realización de este proyecto, por su profesionalidad y la ayuda prestada.

Agradecer sobre todo a mi familia, quienes constantemente me daban fuerzas para poder lograrlo y conseguir que no tirara la toalla.

A todos ellos, gracias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y WEBGRAFÍA

- [1] National Geographic España. La paradoja de Fermi y la existencia de vida extraterrestre. [en línea] National Geographic, 2019. [Consulta: 24 Agosto 2019] Disponible en:< https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/paradoja-fermi-y-existencia-vida-extraterrestre_14031>.
- [2] Sagan, C & Newman, W. I. *Galactic Civilizations: Population dynamics and interstellar diffusion*. Ithaca: Diciembre 1978.
- [3] Stephen Webb. *If the Universe Is Teeming with Aliens... Where Is Everybody? Seventy-Five Solutions to the Fermi Paradox and the Problem of Extraterrestrial Life*. Springer (2015 2nd ed.).
- [4]BBC News. La sonda espacial Voyager 2 de la NASA se convierte en el segundo objeto hecho por el hombre que viaja más allá del Sistema Solar [en línea] BBC News, 2018. [Consulta: 15 Septiembre 2019]. Disponible en:
<<https://www.bbc.com/mundo/noticias-46515634> >.
- [5] AstroMía. Tamaño del Universo. [en línea] AstroMía. [Consulta: 9 Septiembre 2019] Disponible en:< <https://www.astromia.com/universo/tamauniverso.htm> >
- [6] Eric Jones. *Extraterrestrials: where are they?*. Cambridge, CUP. 1995.
- [7] Bjørk, R. Exploring the galaxy using space probes. *International Journal of Astrobiology*. 2007.
- [8] Claudius Gros. Expanding advanced civilizations in the universe. *Journal of the British Interplanetary Society*. 2005. Nº revista 58, pp. 108-110.

ANEXOS

ANEXO A. SCRIPT DE MATLAB DE LA SIMULACIÓN COMPLETA

```
clc
clear all
close all

%% SIMULACIÓN COMPLETA DE LOS RESULTADOS

%% Ecuación (1): Determinar el número de civilizaciones avanzadas
existentes en nuestra galaxia
% Datos: N, L , f
% Donde: N es el número aproximadamente estacionario de civilizaciones
tecnológicamente avanzadas en nuestra galaxia
% L es el tiempo de vida media de las civilizaciones avanzadas [años]
% f es un factor que toma en cuenta ratios de formación de las
estrellas, fracciones de estrellas con sistemas planetarios, etc.

% Condiciones: En el caso de colonización, el factor f es de 10/año

L=double(input('Ingrese el tiempo de vida media de las civilizaciones
avanzadas: '));
f=double(input('Ingrese el factor de ratio formación de las estrellas:
'));

N=L*f;

mN=['El número de civilizaciones avanzadas en nuestra galaxia es de '
num2str(N)];
input(mN)

%% Ecuación (2) Determinar la distancia media entre civilizaciones
tecnológicamente avanzadas
% Datos: A, N
% Donde: A es la distancia media a la que se encuentran las
civilizaciones avanzadas entre si
% N es el número de civilizaciones avanzadas en nuestra galaxia

% Condiciones:
% Valor usual de N del orden de 1 millón de civilizaciones
% La separación media entre estrellas en la Vía Láctea es de 3.26 años
luz
% Asumimos que en nuestra galaxia hay  $2,5 \cdot 10^{11}$  estrellas

A=((2.5*(10^11))/N)^(1/3);

% Pasar el valor de parsecs a años luz (1pc=3.26 años luz)
Al=A*3.26;

mA=['La distancia media entre civilizaciones avanzadas es ' num2str(A)
' pc (aprox ' num2str(Al) ' años luz)'];
input(mA)

%% Ecuación (4) Determinar la fracción de la población que emigra por
```

Colonización de la Galaxia por una civilización extraterrestre tecnológicamente avanzada

Adrián Rodríguez Mota

```
unidad de tiempo al siguiente sistema solar
% Datos: psi, D , m, Ax
% Donde: psi es la fracción de población que emigra al siguiente
sistema solar
% D es el coeficiente de difusión en m dimensiones
% m es el número de dimensiones
% Ax2 es la distancia a la que se encuentra el siguiente sistema solar

psi=double(input('Ingrese la fracción de población que emigra al
siguiente sistema solar: '));
m=double(input('Ingrese el número de dimensiones: '));
Ax2=double(input('Ingrese la distancia a la que se encuentra el
siguiente sistema solar: '));

% psi=2*m*D/Ax2;

mpsi=['La fracción de población que emigra por unidad de tiempo al
siguiente sistema solar es ' num2str(psi) '/año'];
input(mpsi)

% Ecuación (4.1) Determinar la difusión mediante la ecuación (4)
D=(psi*Ax2)/(2*m);

% Pasar de Pc^2/año a cm^2/segundos
Dcm= D*(3.019*(10^29));

mD=['El coeficiente de difusión es ' num2str(D) ' pc^2/año ('
num2str(Dcm) ' cm^2/segundos)'];
input(mD)

%% Ecuación (6) Determinar el periodo de vida mínimo de una
civilización con modelo de crecimiento local y saturación para que sea
capaz de llegar a la Tierra
% Datos: LcCS, f , y, psi, Ax2
% Donde: LcCS es el periodo de vida de una civilización con modelo de
crecimiento local y saturación
% f es un factor que toma en cuenta ratios de formación de las
estrellas, fracciones de estrellas con sistemas planetarios, etc.
% y es la tasa de crecimiento de la población
% psi es la fracción de población que emigra al siguiente sistema
solar
% Ax2 es la distancia a la que se encuentra el siguiente sistema solar

y=double(input('Ingrese la tasa de crecimiento de la población: '));

LcCS=3.3*10^7*((f/0.1)^(-1/4))*([(y/10^-4)*(psi/10^-8)*(Ax2/10)]^(-
3/8));
mLc1=['El periodo de vida mínimo para una civilización con crecimiento
y saturación es ' num2str(LcCS) ' años'];
input(mLc1)

%% Ecuación (7) Determinar el periodo de vida mínimo de una
civilización con modelo de crecimiento poblacional cero (ZPG) para que
sea capaz de llegar a la Tierra
% Datos: LcZPG, f , y, psi, Ax2
% Donde: LcZPG es el periodo de vida de una civilización con modelo de
crecimiento poblacional cero (ZPG)
% f es un factor que toma en cuenta ratios de formación de las
```

Colonización de la Galaxia por una civilización extraterrestre tecnológicamente avanzada

Adrián Rodríguez Mota

```
estrellas, fracciones de estrellas con sistemas planetarios, etc.
% psi es la fracción de población que emigra al siguiente sistema
solar
% Ax2 es la distancia a la que se encuentra el siguiente sistema solar

% Condiciones: Usando un frente de onda térmica con N = 2

LcZPG    =    1.3*10^10*(f/0.1)^(-8/11)*(Ax2/10)^(-12/11)*(psi/10^-8)^(-
3/11);
mLc2=['El periodo de vida mínimo para una civilización con crecimiento
poblacional cero es ' num2str(LcZPG) ' años'];
input(mLc2)

%% Ecuación (8) Determinar la velocidad efectiva del frente de onda de
colonización
% Datos: Ve, y, psi, Ax2
% Donde: Ve es la velocidad efectiva del frente de onda de
colonización
% y es la tasa de crecimiento de la población
% psi es la fracción de población que emigra al siguiente sistema
solar
% Ax2 es la distancia a la que se encuentra el siguiente sistema solar

Ve=1.2*10^-6*[(y/10^-4)*(psi/10^-8)*(Ax2/10)]^(1/2);

mVe=['La velocidad efectiva del frente de onda de colonización es: '
num2str(Ve) ' pc/año'];
input(mVe)

%% Ecuación (10) Determina el valor medio del radio máximo ocupado por
una civilización en expansión colonial
% Datos: d, v, L
% Donde: d es el valor medio del radio máximo ocupado por una
civilización en expansión colonial
% v es la velocidad efectiva del frente de onda de colonización
% L es el tiempo de vida media de las civilizaciones avanzadas [años]

d = Ve*L;

md=['El tamaño medio del radio máximo ocupado por una civilización en
expansión colonial es: ' num2str(d) ' pc'];
input(md)

%% Ecuación (11) Determinar la probabilidad de una interacción entre
dos civilizaciones. Para una distribución aleatoria y uniforme de
civilizaciones
% Datos: p, L, LcCS
% Donde: p es la probabilidad del encuentro entre 2 civilizaciones
% L es el tiempo de vida media de las civilizaciones avanzadas [años]
% LcCS es el periodo de vida de una civilización con modelo de
crecimiento local y saturación

p = (L/LcCS)^4;

mp=['La probabilidad de interacción entre dos civilizaciones avanzadas
es menor o igual a ' num2str(p)];
input(mp)
```

ANEXO B. SCRIPT DE MATLAB PARA LA SIMULACIÓN COLONIZACIÓN DE LA VÍA LÁCTEA Y EL UNIVERSO

```
% Calcular el tiempo que tardaría una civilización técnica avanzada en
colonizar la Vía Láctea y todo el espacio visible desde la Tierra
% El radio de la Vía Láctea: 52850 años luz, es decir un diámetro de
105700
% El límite, es decir el radio, del Universo visible desde la Tierra
está a 46.500 millones de años luz, en todas las direcciones.
% Para la realización de este experimento usaremos la formula (8)
% Un parsec [pc] equivale a 3,26 años luz

% Pasaremos el tamaño del universo a parsec (1pc=3.26156años luz)
tu=46500000000/3.26156;

% Ahora pasamos el tamaño de la Vía Láctea
tv1=52850/3.26156;

% Veremos ahora la velocidad con valores nominales de la tasa de
% crecimiento, la tasa de emigración y la distancia media entre
sistemas

mensaje=('Valores nominales de cada variable respectivamente: 10^-4,
10^-8, 10');
input(mensaje)
y = input('Ingrese el valor de la tasa de crecimiento de población:
');
psi = input('Ingrese la fracción de población que emigrara al
siguiente sistema solar: ');
Ax2 = input('Ingrese la distancia a la que encuentra el siguiente
sistema: ');

v=1.2*10^-6*[(y/10^-4)*(psi/10^-8)*(Ax2/10)]^0.5;

v1=['La velocidad efectiva del frente de onda de colonización es: '
num2str(v) ' pc/año'];
input(v1)

Tv1=tv1/v;
Tu=tu/v;

% El tiempo que tardaría el frente de onda de colonización en...
Tv1=['El tiempo que tardaría la civilización en colonizar la Vía
Láctea seria: ' num2str(Tv1) ' años'];
input(Tv1)
T1=['El tiempo que tardaría la civilización en colonizar todo el
universo visible seria: ' num2str(Tu) ' años'];
input(T1)
```


ANEXO C. SCRIPTS DE MATLAB PARA LA REALIZACIÓN DE LAS GRÁFICAS

```
% Ecuación (1) Determinar el número aproximado estacionario de
civilizaciones avanzadas en nuestra galaxia.
% f es de 10/año
% L valores de [1,100000]

f=10;
L=linspace(1,100000);

N=L*f;

figure(1),plot(L,N), title('Número de civilizaciones avanzadas en la
Vía Láctea'), xlabel('Vida media de las civilizaciones avanzadas
[años]'), ylabel('N° de civilizaciones [unidad]');
grid on

% Ecuación (2) Determinar la distancia media entre civilizaciones
avanzadas
% Grafica 1: Valor N° de estrellas fijo en  $2.5 \cdot 10^{11}$ 
% Valor de N variable, de 1 a 1 millón
N=linspace(1,1000000);

A1 = (( $2.5 \cdot 10^{11}$ )*(N.^-1)).^(1/3);

% Grafica 2: Valor N fijo en 1 millón de civilizaciones
% Valor de x (N° de estrellas) variable, de 1 millón a
 $2.5 \cdot 10^{11}$ 
x=linspace( $10^6$ , $2.5 \cdot 10^{11}$ );
A2=(x/ $10^6$ ).^(1/3);

figure(1),plot(N,A1), title('Distancia media entre civilizaciones
avanzadas '), xlabel('N° de civilizaciones avanzadas'),
ylabel('Distancia media [pc]');
grid on
figure(2),plot(x,A2), title('Distancia media entre civilizaciones
avanzadas '), xlabel('N° de estrellas en nuestra galaxia'),
ylabel('Distancia media [pc]');
grid on

% Ecuación (4) Determinar la fracción de la población que emigra por
unidad de tiempo al siguiente sistema solar
% Haremos las gráficas con un valor de m de 3, ya que es el utilizado
en
% el artículo para realizar los cálculos.

m=3;

% Grafica 1: Coeficiente de Difusión (D) variable, [ $5 \cdot 10^{-9}$ ,0.05]
% Distancia entre sistemas solares (Ax2) con valor fijo en
 $10 \text{ pc}^2$ 
D1=linspace( $5 \cdot 10^{-9}$ ,0.05);
Ax1=10;

psil=2*m*D1/Ax1;
```

Colonización de la Galaxia por una civilización extraterrestre tecnológicamente avanzada

Adrián Rodríguez Mota

```
% Grafica 2: Distancia entre sistemas solares (Ax2) variable, [1,1000]
%             Coeficiente de Difusión (D) con valor fijo en 1.6667*10^-
8 [pc^2/año]
Ax2=linspace(3,1000);
D2=1.6667*10^-8;

psi2=(2*m*D2)./Ax2;

figure(1),plot(D1,psi1), title('Fracción de población que emigra al
siguiente sistema solar'), xlabel('Coeficiente de difusión
[pc^2/año]'), ylabel('Tasa de emigración[/año]');
grid on
figure(2),plot(Ax2,psi2), title('Fracción de población que emigra al
siguiente sistema solar'), xlabel('Distancia media entre sistemas
solares [pc^2]'), ylabel('Tasa de emigración[/año]');
grid on

% Ecuación (6) Determinar el periodo de vida mínimo de una
civilización con modelo de crecimiento local y saturación para que sea
capaz de llegar a la Tierra
% Parámetros de las variables:
% Valores mínimos (f,psi,y,Ax2) = (0.1,10^-8,10^-4,1)
% Valores máximos (f,psi,y,Ax2) = (10, 10^-4,10^-4,1000)
% Valores nominales (f,psi,y,Ax2) = (10,10^-8,10^-4,10)

% Valores nominales
f=10;
psi=10^-8;
y=10^-4;
Ax2=10;

% Gráfica 1:
f1=linspace(0.1,10);

LcCS1=3.3*10^7*((f1/0.1).^(-1/4))*([(y/10^-4)*(psi/10^-8)*(Ax2/10)]^(-
3/8));

figure(1),plot(f1,LcCS1), title('Periodo de vida mínimo crítico para
alcanzarnos'), xlabel('Factor ratio formación estrellas'),
ylabel('Periodo de vida [años]');
grid on

% Gráfica 2:
psi1=linspace(10^-8,10^-4);

LcCS2=3.3*10^7*((f/0.1)^(-1/4))*([(y/10^-4)*(psi1/10^-8)*(Ax2/10)].^(-
3/8));

figure(2),plot(psi1,LcCS2), title('Periodo de vida mínimo crítico para
alcanzarnos'), xlabel('Tasa de emigración [/año]'), ylabel('Periodo de
vida [años]');
grid on

% Gráfica 3:
Ax21=linspace(1,1000);

LcCS4=3.3*10^7*((f/0.1)^(-1/4))*([(y/10^-4)*(psi/10^-8)*(Ax21/10)].^(-
3/8));
```

```
figure(3),plot(Ax21,LcCS4), title('Periodo de vida mínimo crítico para  
alcanzarnos'), xlabel('Distancia media entre sistemas solares  
[pc^2]'), ylabel('Periodo de vida [años]');  
grid on  
  
% Ecuación (7) Determinar el periodo de vida mínimo de una  
civilización con modelo de crecimiento local y saturación para que sea  
capaz de llegar a la Tierra  
% Parámetros de las variables:  
% Valores mínimos (f,psi,y,Ax2) = (0.1,10^-8,10^-4,1)  
% Valores máximos (f,psi,y,Ax2) = (10, 10^-4,10^-4,1000)  
% Valores nominales (f,psi,y,Ax2) = (10,10^-8,10^-4,10)  
  
% Valores nominales  
f=10;  
psi=10^-8;  
Ax2=10;  
  
% Gráfica 1:  
f1=linspace(0.1,10);  
  
LcZPG1 = 1.3*10^10*(f1/0.1).^(-8/11)*(Ax2/10)^(-12/11)*(psi/10^-8)^(-  
3/11);  
  
figure(1),plot(f1,LcZPG1), title('Periodo de vida mínimo crítico para  
alcanzarnos'), xlabel('Factor ratio formación estrellas'),  
ylabel('Periodo de vida [años]');  
grid on  
  
%Gráfica 2:  
psi1=linspace(10^-8,10^-4);  
  
LcZPG2 = 1.3*10^10*(f/0.1)^(-8/11)*(Ax2/10)^(-12/11)*(psi1/10^-8).^(-  
3/11);  
  
figure(2),plot(psi1,LcZPG2), title('Periodo de vida mínimo crítico  
para alcanzarnos'), xlabel('Tasa de emigración [/año]'),  
ylabel('Periodo de vida [años]');  
grid on  
  
% Gráfica 3:  
Ax21=linspace(1,1000);  
  
LcZPG3 = 1.3*10^10*(f/0.1)^(-8/11)*(Ax21/10).^(-12/11)*(psi/10^-8)^(-  
3/11);  
  
figure(3),plot(Ax21,LcZPG3), title('Periodo de vida mínimo crítico  
para alcanzarnos'), xlabel('Distancia media entre sistemas solares  
[pc^2]'), ylabel('Periodo de vida [años]');  
grid on
```

Colonización de la Galaxia por una civilización extraterrestre tecnológicamente avanzada

Adrián Rodríguez Mota

```
% Ecuación (8) Determinar la velocidad efectiva del frente de onda de
colonización
% Valores mínimos (psi,y,Ax2) = (10^-8,10^-4,1)
% Valores máximos (psi,y,Ax2) = (10^-4,10^-4,1000)
% Valores nominales (psi,y,Ax2) = (10^-8,10^-4,10)

y=10^-4;
psi=10^-8;
Ax2=10;

% Velocidad con psi variable, Ax con valor nominal
psi1=linspace(10^-8,10^-4);
vpsi=1.2*10^-6*[(y/10^-4)*(psi1/10^-8)*(Ax2/10)].^(1/2);

% Velocidad con Ax variable, psi con valor nominal
Ax21=linspace(1,1000);
vAx=1.2*10^-6*[(y/10^-4)*(psi/10^-8)*(Ax21/10)].^(1/2);

% Realización de las gráficas
figure(1),plot(psi1,vpsi), title('Velocidad efectiva del frente de
onda de colonización'), xlabel('Tasa emigración [/año]'),
ylabel('Velocidad efectiva [pc/año]');
grid on
figure(2),plot(Ax21,vAx), title('Velocidad efectiva del frente de onda
de colonización'), xlabel('Distancia del sistema solar [pc^2]'),
ylabel('Velocidad efectiva [pc/año]');
grid on
```